

Der Stab im Tragwerk
- Erweiterung eines tradierten Begriffs unter
besonderer Berücksichtigung der Hohlprofile

Von der
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
Sebastian Hoyer
geboren am 19.08.1975
aus Wolfenbüttel

Eingereicht am: 18. Juni 2018
Disputation am: 12. November 2018

Berichterstatter: Prof. Berthold Burkhardt
Prof. Dr. sc. techn. Klaus Thiele

Kurzfassung

Tragwerke aus Stäben bilden eine der ältesten Konstruktionsformen und prägen die konstruktiven Disziplinen bis aktuell in den Formleichtbau.

Mit der Methodik des Explizierens, nach Rudolf Carnap, wird der Begriff »Stab« im Kontext seiner baukonstruktiven Verwendung einer eingehenden Betrachtung seiner Bedeutungsebenen und ihrer Merkmale unterzogen, um ein erweitertes Verständnis der Formen seines Tragverhaltens zu bilden und mit einem Explikat benennen zu können.

Es wird gezeigt, wie sich ein bildhafter Begriff für Objekte der Umwelt bzw. anthropogenem Ursprungs zum *terminus technicus* in den konstruktiven Disziplinen wandelte und sich ein Vorstellungsraum zu dessen Modell formte, das seinerseits zur Asymptote für das Bauteil »Stab« wurde. Es wird herausgestellt, dass trotz des fachsprachlichen Gebrauchs seine Bedeutung innerhalb der realen Objekte und ihrer Modelle nicht widerspruchsfrei definiert ist; dessen ungeachtet aber Konsens darüber herrscht, dass der Knickstab die gebräuchlichsten Attribute für Stab-Elemente auf sich vereint und die Stabtragwerke dominiert.

In diesem Kontext werden die Gussstützen und das nahtlose Stahlrohr als eine formgebende Antwort mit praktischer Bedeutung für schlanke Stäbe identifiziert und der gemeinsame Ursprung des Formkonzeptes mit dem der älteren Leitungsrohre verglichen. Neben den Aspekten historische Werkstoffe und Produktion röhrenförmiger Stäbe, wird aus bautechnikgeschichtlicher Perspektive der Parameter »Schlankheit« und seine Rolle in historischen Bemessungsverfahren aufgearbeitet. Die Interdependenzen zwischen Technologie und Theorie werden anhand einer synoptischen Darstellung wegweisender Objekte bzw. geplanter Projekte des Bauwesens und des Maschinen- & Anlagenbaus der letzten 400 Jahre vorgestellt und die Eignung des Hohlprofiles als Pendelstab und die Strategien seiner Optimierung kritisch diskutiert.

Als Komplementär zum Knickstab wird anhand von Beispielen aus vernakulären Architekturen und anhand jüngerer Experimentalbauten belegt, dass das flexible, biegeeweiche Tragverhalten von extrem schlanken Stäben sich sinnvoll zur Erstellung von Tragwerken ebenso eignet, und somit den unscharfen Begriff »Stab«, im Sinne des Explizierens, produktiv erweitert. Es wird der Begriff »stabförmig« eingeführt und exemplarisch zur Synthese eines extrem schlanken, stabför-

migen Hybrides mit eingprägter Vorverformung auf Basis von Hohlprofilen angewendet und seine Verwendung als Leichtbauelement diskutiert.

Keywords:

Stab, Explizieren, Bautechnikgeschichte, Stahlrohr, Gusssttze, Hohlprofil, Schlankheit, Leichtbau

„THINGS THEMSELVES ARE LYING,
AND
SO ARE THEIR IMAGES“

Robert Le Ricolais

Danksagung

Mein uneingeschränkter Dank gilt an erster Stelle Professor Berthold Burkhardt, der bereits uns Studierende in den unteren Semestern der Tragwerkslehre ermutigte, durch forschendes Fragen sich das weite Feld der gebauten Umwelt ein Stück weit selbst zu erschließen.

Dankbar bin ich, dass diese Ermutigung aus den Anfängen im persönlichen Betreuungsverhältnis dieser Dissertation ihre konsequente Fortsetzung fand und ich neben den zahlreichen Hinweisen und Kontakten auch großzügig Einblick in das Material der privaten Sammlung Burkhardt nehmen durfte.

In der Person Professors Dr.-Ing. Harald Kloft fand ich einen Förderer meines Dissertationsvorhabens, der in der Nachfolge auf dem Lehrstuhl dem bestehenden Betreuungsverhältnis zur Seite stand und mir persönlich viele Freiräume zur Bearbeitung dieser Schrift gewährte.

Danken möchte ich auch Professor Dr. sc. techn. Klaus Thiele, der in entscheidender Phase dieser Arbeit die Planung und Auswertung der Experimente beriet und deren Durchführung am Institut für Stahlbau ermöglichte.

Nicht zuletzt gehört meinen zahlreichen Kollegen und Kolleginnen meine Dankbarkeit für ihre vielfältige Unterstützung – hier namentlich zu nennen Dipl.-Ing. Christoph Müller als kritischen Diskutanten und meine Kollegin Dr.-Ing. Federica Loccarini, die mir insbesondere bei der Auswertung der historischen, romanischen Texte eine große Unterstützung war.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit begann ich begleitend zu meiner Assistenz in der Lehre am Institut für Tragwerksplanung, Professor Berthold Burkhardt, das mit der Nachfolge Professors Dr.-Ing. Harald Kloft, die Bezeichnung Institut für Tragwerksentwurf trägt, wo ich weiterhin in der Lehre und Forschung tätig war. Mit meinem Wechsel an das Institut für Bauwerkserhaltung und Tragwerk, Professor Dr. sc. techn. Klaus Thiele, erreicht die eigene Forschung schließlich inhaltlich und formal die Voraussetzungen, sie als Dissertationsschrift einreichen zu können.

Während meiner Tätigkeit für die drei Institute, begleitet mich als Konstante ein gestiegenes Interesse zu Fragen der Bautechnikgeschichte, da einerseits die material- und verfahrensgerechte Erhaltung der gebauten Umwelt zu bewältigen ist, und andererseits die Kenntnis von Entwicklungslinien Inspiration für zukünftige Bauweisen liefern kann.

Die Arbeit konnte im erst genannten Aspekt von einer Fülle an jüngeren Beiträgen zur Bauwerkserhaltung und Bauforschung der Eisen- und Stahlkonstruktionen profitieren. Wesentlich war aber die Möglichkeit, auf digitalisierte Originalwerke aus den letzten 500 Jahren zugreifen zu können, wie es in diesem Umfang erst seit Kurzem gestattet ist. Dem kritischen Studium von Primärquellen wird daher ein großer Raum gegeben, um die Zusammenhänge von Objekt und Theorie in verschiedenen Epochen interpretieren zu können. Gleichwohl ist mit dieser Ubiquität und Diversität der Quellenlage ein Anspruch auf Vollständigkeit nicht mehr realisierbar, und Wertungskategorien des ersten, größten etc. verlieren an kategorischer Aussagekraft – wenn gleich dieses Vorgehen zur Darstellung von Entwicklungslinien unerlässlich bleibt.

In anderer Hinsicht konnte diese Arbeit in einem geistigen Klima entstehen, das ich als ein neues produktives Geschichtsbewusstsein in den Ingenieurwissenschaften bezeichnen möchte, das mit Rückgriff auf die eigene und die disziplinfremde Vergangenheit Neues generieren will.

In diesem Kontext möchte ich diese Dissertationsschrift verstanden wissen und wünsche mir, dass sie als ein kritischer Beitrag neue Perspektiven – in die Vergangenheit und in die Zukunft – öffnen mag.

Sebastian Hoyer,
Braunschweig, den 24. August 2018

Inhaltsverzeichnis

Titelblatt	
Kurzfassung	i
Widmung	iii
Danksagung	v
Vorwort	vii
Inhaltsverzeichnis	ix
Vorbemerkung Abbildungs- und Tabellenverzeichnis	xiii
Abkürzungsverzeichnis	xv
Symbolverzeichnis	xvii

■ Erster Abschnitt: Einleitung und Fragestellung

1.0 Einführung	1
1.1 Methodik	5
1.1.1 Über den Abschnitt Grundlagen	5
1.1.2 Über den Abschnitt Vertiefung	6
1.1.3 Über den Abschnitt Komplementär	7
1.1.4 Über den Abschnitt Explikat	7
2.0 <i>Explikandum Stab</i> – Entwicklungsgeschichte vom Stock zum Stab im Tragwerksmodell	9
2.1 Explizieren	10

■ Zweiter Abschnitt: Grundlagen

3.0 Herkunft und Bedeutung des Begriffs <i>Stab</i>	13
3.1 Die Abstraktion des Stabes in der Konstruktion	13
4.0 Einführung in die Begrifflichkeiten von Büttner & Hampe	19
5.0 Abgrenzungskriterien des physischen Stabes	
- geometrische Größen und Proportionen	27
5.1 Schlankheiten von Stäben	30
5.2 Die triviale Schlankheit	31
5.3 Von der Vorstellung der Schlankheit bei Leonardo da Vinci	32
5.3.1 Leonardos Beobachtungen zum Tragverhalten von Stützen	32
5.3.2 Einordnung der Erkenntnisse Leonardos	43
5.4 Von der Vorstellung der Schlankheit bei Pieter van Musschenbroek	44
5.4.1 Musschenbroeks empirischer Ansatz	44
5.4.2 Einordnung der Erkenntnisse Musschenbroeks	50

5.5	Begriff der Schlankheit λ nach Euler	52
5.5.1	Eulers analytischer Ansatz	52
5.5.2	Die Euler-Fälle	55
5.5.3	Die historische Bedeutung von λ_{\min} und λ_{\max}	57
5.6	Von der Vorstellung der Schlankheit bei Hodgkinson	62
5.6.1	Hodgkinsons empirischer Ansatz	62
5.6.2	Einordnung der Erkenntnisse Hodgkinsons	67
5.6.3	Persistenz des Hodgkinson'schen Ansatzes	67
5.7	Die Relative Konstruktive Schlankheit λ nach Frei Otto	69
5.7.1	Das Bic- λ -Diagramm	70
6.0	Darstellung von physischen Stäben	75
6.1	Genuine Stäbe	75
6.1.1	Technische Verwendung von genuinen Stäben	75
6.2	Synthetische Stäbe	77
6.2.1	Technische Verwendung von synthetischen Stäben	77
6.2.2	Die aktuellen Herstellungsverfahren für Stahlhohlprofile	78
6.2.3	Normen	80
6.3	Exkurs Urhütte	82

■ Dritter Abschnitt: Vertiefung

7.0	Berührungspunkte der Entwicklungslinien von Rohren und Hohlprofilen	89
7.1	Historische Produktionsarten von Metallrohren	89
7.2	Der Ursprung als Gefäß	91
7.3	Das Leitungsrohr für Trinkwasser	92
7.4	Das Leitungsrohr für Leuchtgas	95
7.5	Das Leitungsrohr für Dampfmaschinen	96
7.6	Assemblierte Behälter, Raumzellen und Gerüste	96
7.6.1	Schiffbare Aquädukte aus Gusseisen	97
7.6.2	Röhrenbrücken aus Schmiedeeisen	97
7.6.3	Frühe Rohrkonstruktionen bei ortsfesten Seezeichen	107
7.6.4	Das Quadrant-Eisen als Brückentechnologie	112
7.7	Rohre in der frühen Waffentechnik	117
7.8	Erste Gussstützen in der Architektur	119
7.8.1	Die Eisensäule von Neu Dehli	119
7.8.2	Die feuerfesten englischen Textilfabriken	121
7.8.3	Frühe Beispiele aus dem deutschsprachigen Raum	121
7.8.4	Die Gussstütze als Systembauteil	123
7.9	Gusseiserne Röhrenbrücken	125
7.10	Gitterpfeiler für Viadukte	130
7.11	Aussichtsturm Büchenbronner Höhe	134

8.0	Über die besondere Eignung hohler Stäbe aus Eisenwerkstoffen	141
8.1	Die Stütze	141
8.2	Vorteile der historischen Gussstützen	142
8.2.1	Die Materialfestigkeit von Gussstützen im Vergleich	142
8.2.2	Die Gestaltform des Kreisrings bei hohlen Gussstützen	143
8.3	Galileis Erkenntnis über den Gestalteinfluss	145
8.4	Bemessungsverfahren	147
8.4.1	Barrés Schnellbemessung – Implizite Aussagen zur Effizienz	147
8.4.2	Explizite Aussagen zur Effizienz bei Klasen um 1876	152
8.4.3	Explizite Aussagen zur Effizienz bei Königer um 1902	152
8.4.4	Bemessung – von der Empfehlung zur Verordnung	154
8.5	Das Stahlrohr wird Konstruktionselement	159
8.5.1	Attribute von Hohlprofilen	160
8.5.2	Die Fügung von Hohlprofilen	162
8.5.3	Erste Werkstoffe für Hohlprofile	165
8.5.4	Das Hohlprofil in der Vermarktung	165
8.6	Impulse aus dem Maschinen- und Anlagenbau für Hohlprofilkonstruktionen	168
8.6.1	Ein früher Ausblick	168
8.6.2	Adaption durch die Kriegsmarine	169
8.6.3	Frühe Röhrentürme und andere Objekte aus Stahlrohren	170
8.7	Hohlprofile als Systembauelemente im Leichtbau	175
8.7.1	Darstellungsformen der Attribute von Hohlprofilen	175
8.7.2	Zeitgenössische Rezeption und Diskussion	176
8.7.3	Lösbare Verbindungen für ebene und räumliche Fachwerke	177
9.0	Optimierungsstrategien für hohle Stäbe aus Eisenwerkstoffen als Pendelstab	189
9.1	Strukturelle und geometrische Imperfektionen	189
9.2	Optimierung der Gestaltform	192
9.3	Impulse aus dem Naturstudium	195
9.3.1	Rohrleichtbauformen bei Leonhardt	196
9.3.2	Rohrleichtbauformen bei Mengerhausen	198
9.3.3	Rohrleichtbauformen bei Le Ricolais	200
9.3.4	Seilverspannte Druckstäbe	203
9.3.5	Rohrleichtbauformen in anderen Konstruktionsdisziplinen	206
 ■ Vierter Abschnitt: Komplementär		
10.0	Biegeeweiche Stäbe in Natur und Technik	217
10.1	Der Stab als mechanische Feder	220
10.2	Der Stab als federndes Tragstrukturelement	225
10.3	Die <i>Grenzhöhe</i> elastischer Stäbe nach Frei Otto	226
10.3.1	Mögliche Anwendungsfelder extrem schlanker Stäbe	227
10.4	Active Bending	228

■ Fünfter Abschnitt: Explikat

11.0	Das Explikat	233
11.1	Explikat Stabförmigkeit	236
12.0	Synthese mit Hilfe des Explikats	239
12.1	Herleitung eines generischen Modells	239
12.1.1	Beschreibung des qualitativen Tragverhaltens	240
12.1.2	Größe und Art der eingprägten Vorverformung	242
12.1.3	Beschreibung des Verformungsverhaltens	244
12.1.4	Beschreibung des quantitativen Tragverhaltens	248
12.2	Simulation eines spezifischen Modells	249
12.3	Tastversuch Hybrid T05	251
12.3.1	Versuchsanordnung	251
12.3.2	Versuchsdurchführung und Einordnung der Ergebnisse	253
12.3.3	Leichtbaukennwerte des stabförmigen Hybriden T05	260
12.4	Bewertung	261
12.5	Anwendungsmöglichkeiten	262
13.0	Ergebnisse	267
13.1	Resümee	267
13.1.1	Aus dem Abschnitt Einleitung und Fragestellung	267
13.1.2	Aus dem Abschnitt Grundlagen	268
13.1.3	Aus dem Abschnitt Vertiefung	272
13.1.4	Aus dem Abschnitt Komplementär	279
13.1.5	Aus dem Abschnitt Explikat	281
13.2	Fazit	283
13.2.1	Sekundäre Ergebnisse	284
13.3	Ausblick	285

■ Sechster Abschnitt: Anhang

Bibliographie	287
Internetquellen	296
Software	297
Normen	297
Patente	297
Archivalien	298
Messdaten	299

Vorbemerkung Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

An dieser Stelle wird aus Gründen der Übersichtlichkeit kein voll umfängliches Abbildungs- und Tabellenverzeichnis vorangestellt. Die Verzeichnisse wurde kapitelweise erstellt und befindet sich direkt am Ende eines jeden der 13 Hauptkapitel. Die eindeutige Zuordnung erfolgt über den Charakter der Illustration: Abb. für Abbildung bzw. Tabelle, gefolgt von der römischen Ziffer des entsprechenden Hauptkapitels; getrennt durch einen Punkt, abschließend die fortlaufende Nummerierung in arabischen Ziffern. Wie bei den Fußnoten, wird bei jedem Hauptkapitel die Zählung bei eins begonnen.

Abkürzungsverzeichnis

#	Nummer	verbess.	verbesserte
&	und	Verl.	Verlag
Abb.	Abbildung	Verl.anst.	Verlagsanstalt
Abt.	Abteilung	verm.	vermehrte
aktu.	aktualisiert	Verm.	Vermerk
Anm.	Anmerkung	vermut.	vermutlich
Anon.	Anonymos	vgl.	vergleiche
Arch.	Archiv	Vol.	Volumina
Aufl.	Auflage	vollst.	vollständig
Bd. (Pl. Bde.)	Band	vs.	versus
bearb.	bearbeitet	www	world wide web
bed. verm.	bedeutend vermehrt	z.B.	zum Beispiel
Beil.	Beilage	zgst.	zusammengestellt
Bl.	Blatt		
bzw.	beziehungsweise		
ca.	circa		
d.h.	das heißt		
e.V.	eingetragener Verein		
ebd.	ebenda		
erg.	ergänzte		
erlä.	erläutert		
erw.	erweitert		
et. al.	et alii		
etc.	et cetera		
f (Pl. ff)	folgend, folgende		
fac.	facsimile		
ggf.	gegebenenfalls		
Hrsg.	Herausgeber		
Jg.	Jahrgang		
Jh.	Jahrhundert		
Jun.	Junior		
korri.	korrigiert		
lfd.	laufende		
Mitarb.	Mitarbeiter		
Mitverf.	Mitverfasser		
Nachdr.	Nachdruck		
Nr.	Nummer(n)		
o.A.	ohne Autor		
o.g.	oben genannt		
o.J.	ohne Jahr		
o.O.	ohne Ort		
Pl.	Plural		
publi.	publiziert		
S.	Seite		
s.	siehe		
s.o.	siehe oben		
s.u.	siehe unten		
sic	tatsächlich so		
Sig.	Signatur		
Sub.	Substantiv		
Tf.	Tafel		
u.	und		
u.a.	unter anderem		
u.U.	unter Umständen		
überarb.	überarbeitet		
übersetz.	übersetzt		
umgearb.	umgearbeitete		
usw.	und so weiter		
v.Chr.	vor Christi Geburt		

Symbolverzeichnis

Da im Rahmen dieser Arbeit u.a. historische Berechnungen und Formeln zitiert werden, ist eine umfängliche Auflistung aller Symbole und verwendeten Einheiten nicht sinnvoll darstellbar, da in der Historie und im nicht deutschsprachigen Raum abweichende Bezeichnungen zur Anwendungen kamen und kommen, die in einer Liste zu Ambiguitäten führen würden. Um Eindeutigkeit zu gewährleisten, wird in der Kommentarzeile, neben dem Fließtext, ggf. die Erklärung von Symbolen und Einheiten für einzelne Gleichungen etc. aufgeschlüsselt.

Einheiten:	Bedeutung:	SI-Einheit:
"	Linie $\triangleq \frac{1}{10}$ " bzw. $\frac{1}{12}$ "	
"	Zoll	wenn nicht anders verm.: 2,54 cm
'	Fuß	wenn nicht anders verm.: 30,48 cm
mm	Millimeter	/
cm	Zentimeter	/
m	Meter	/
m ²	Quadratmeter	/
m ³	Kubikmeter	/
N	Newton	$g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
g	Gramm	/
kg	Kilogramm	/
t	Tonne	/
lb (Pl. lbs)	engl. Pfund	453,59237 g
°	Grad: für ebene Winkel	$1^\circ = \frac{\pi}{180}$
Pa	Pascal	$\frac{N}{m^2}$
at	Technische Atmosphäre	98,0665 kPa
bar	Bar: Druck für Gase/Flüssigkeiten	100 kPa

Symbole:	Bedeutung:	SI-Einheit bzw. Einheit:
$I_{y;z}$	Flächenträgheitsmoment	cm ⁴
$W_{y;z}$	Widerstandsmoment	cm ³
A	Fläche	cm ²
i	Flächenträgheitsradius	cm
E	Elastizitätsmodul	$\frac{N}{mm^2}$ oder Pa
ϵ	Dehnung	% oder ‰
σ	Spannung	$\frac{N}{mm^2}$
π	Kreiszahl Pi	3,14159...
$S_{y;z}$	Statisches Moment	cm ³
s_k	Knicklänge	cm
N_k	Verzweigungslast	kN
λ	Grad der Schlankheit	/
$Q_{y;z}$	Alte Bezeichnung für Querkraft heute V	kN
$M_{x;z}$	Moment	kNm

N	Normalkraft	kN
h, H	Höhe	mm, cm, m
b	Breite	mm, cm, m
d	Dicke bzw. Breite	mm, cm, m
l, L	Länge	mm, cm, m
LE	Längeneinheit	/
r	Radius	mm, cm, m
V	Volumen	cm ³
$F_{kr.}$	Bruchkraft hist. in kg	kN
c_x	Materialkonstante hist.	/
σ_k	Knickspannung	$\frac{N}{mm^2}$
ω	Omega-Beiwert der DIN 4114	/
κ	Kappa-Beiwert der DIN 18800	/
χ	Chi-Beiwert Euro Code 3	/
$f_{u,k}$	Bruchdehnung	$\frac{N}{mm^2}$
$f_{y,k}$	Dehngrenze	$\frac{N}{mm^2}$
$f_{y,d}$	Bemessungsspannung	$\frac{N}{mm^2}$
Tra	Grenztragfähigkeit nach Frei Otto	Nm
Bic	Masse des Körpers auf sein Tra bezogen	$\frac{g}{Nm}$
ϱ	Dichte	$\frac{g}{cm^3}$
G	Eigengewicht	g
Z_L	Leichtbaukennzahl nach Mengeringhausen	
E_{pot}	Potentielle Energie	J (Joule)
k	Federkonstante	Nm^{-1}
η_F	Federwirkungsgrad	/
$W_{E;B}$	Arbeit	J (Joule)
:=	Ist definiert als	/

1.0 Einführung

Tragelemente aus Stäben gehören zu den ältesten Konstruktionen der Menschheit. Die Verwendung von stabförmigen Hölzern und Knochen, zur Herstellung von Werkzeugen und Bauwerken, lässt sich archäologisch schon in der Frühgeschichte der Menschheit nachweisen und umfasste dabei grundverschiedene Funktionen, die sich unter anderem durch die differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen Maßstabsebenen der von der Natur entlehnten, stabförmigen Entitäten erschließt.

Das Spektrum reicht von der Mikro-Maßstabsebene der pflanzlichen und tierischen Fasern für Gewebtes, über die Meso-Maßstabsebene der dünnen Zweige für Flechtwerk, zur Makro-Maßstabsebene der Stämme und Knochen, wie sie für Zelte vor ca. vor 30.000 Jahren in Sibirien¹ und für Pfahlbauten ca. 6000 v.Chr. im Mittelmeerraum beispielhaft als Tragwerkselemente nachgewiesen werden konnten. So ist eine der frühesten Abbildungen einer Pfahlsiedlung in der Punthalle von Dair el-bahri, Ägypten, von 1482 v.Chr.², uns überliefert.

Ein Wesensmerkmal von Stäbchen und Stäben kann somit in der Vielfalt ihrer Kombinationsmöglichkeiten zu Strukturen mit unterschiedlichsten Eigenschaften gesehen werden. Dabei scheint das Flächenhafte, Textile in diametralem Kontrast zum Linearen, Formfesten einer Stütze zu stehen. So diene der Stab sowohl bei frühen Zeltkonstruktionen mit Fellhäuten als auch bei den sogenannten Feuchtbodensiedlungen vorrangig als Tragelement und weniger dem Raumabschluss³, wie es im Gegensatz dazu das Gewebe oder Flechtwerk taten.

Die Fügung von Stäben der Makro-Maßstabsebene zu Tragstrukturen war früh im Fokus einer, zunächst empirisch gestützten, konstruktiven Betrachtung, die aber unsere Vorstellung vom Stab im Tragwerk seitdem dominiert. Die Festigkeit des Materials, das Verhältnis von Höhe zu Durchmesser und die Lagerung/Anschlüsse wurden als Parameter der Tragfähigkeit erkannt, und führten zu einer stetigen Weiterentwicklung von Stabtragwerken, die nun nicht mehr allein in der Holzbautechnik realisiert wurden. Die ingenieurmäßige Fachwerkbauweise wurde in theoretischer und baupraktischer Weise beherrschbar, sodass Systeme mit einer neuen Maßstäblichkeit projiziert werden konnten, bei denen die Stäbe wiederum aus weiteren Stäben als Subsystem bestehen konnten. Auch einfache Stabtragwerke, wie Maste und Stützen erreichten durch Abspannungen neue Dimensionen.

¹ Burkhardt: Zeltarchitektur, 1986, S. 13

² Siehe: Turza: Pfahlbauten, o.J., S. 5

³ Siehe: Schlichtherle: Pfahlbauten, 1997, S. 9ff

Das Stabilitätsproblem des Stabes auf Knicken trat in den Vordergrund und fand in den Rohren aus Eisenwerkstoffen eine neue formgebende Antwort mit baupraktischer Bedeutung. Das hohe E-Modul von Eisenwerkstoffen, ein günstiger Trägheitsradius und die immer preiswertere Verfügbarkeit ließen die hohlen Gusseisenstützen zu einem leistungsfähigen Konstruktionselement werden. Die konsequente Weiterentwicklung setzte sich im nahtlosen Stahlrohr der Brüder Mannesmann ab 1885^{4,5} fort, das aufgrund seiner Duktilität und Schweißbarkeit leistungsfähigere Tragwerke ermöglichen sollte.

Der heutige Entwicklungsstand der Stabtragwerke kann im Allgemeinen aus einer kontinuierlichen Weiterentwicklung der Fügung der Stäbe und ihrer Beurteilung als Stabmodell nach Euler aufgefasst werden. Die für die Euler-Fälle maßgebenden Randbedingungen sind die Lagerung des Stabes, sein E-Modul und sein Trägheitsradius. Diese Modellauffassung wird flankiert durch die anerkannten Forderungen nach Gebrauchstauglichkeit und Sicherheit im Bauwesen; Erstere wird im Allgemeinen durch eine starke Beschränkung der Verformungen von Tragwerken erfüllt und Letztere, speziell bei schlanken Druckgliedern, durch hohe Sicherheitsreserven bei der Traglast zur Vermeidung des Stabilitätsversagens.

Anhand der baupraktischen Entwicklungsgeschichte kann gezeigt werden, wie ein natürlich vorkommendes Konstruktionselement, der Stab mit all seinen geometrischen und materialtechnischen Imperfektionen, durch Idealisierung zum Modell abstrahiert wurde, welches selbst zur Ausgangsbasis für theoretische Überlegungen wurde. Eulers⁶ rein analytische Betrachtung des Stabilitätsversagens konnte nur auf der Basis dieser Abstraktion, im Kontext der Mathematik gelöst werden – diese Abstraktion und vielmehr die Erkenntnisse daraus sollten wiederum die Praxis stark beeinflussen und fand über Jahrzehnte seinen Ausdruck im ω -Verfahren⁷ zur Bemessung von knickgefährdeten Stäben. Das Modellverständnis eines idealen Stabes wurde so zur Asymptote für das Bauteil Stab und erforderte seine fortschreitende physische Anpassung an den geraden, steifen Modellstab. Entsprechend verfolgen die Optimierungsstrategien eine Erhöhung des E-Moduls bei anhaltender Duktilität und die Erhöhung des Trägheitsradius an den maßgebenden Stellen.

Zu 4,5:

Dr. Fritz Kögel, als Strohmänn für die Brüder Mannesmann, meldete die beiden grundlegenden Verfahren zum Patent an: „*Schrägwalzverfahren nebst zugehörigem Walzwerk*“, Deutsches Reichspatent #34617, 1885 und „*Verfahren und Walzwerk zum Formen und Kalibrieren von stabförmigen Körpern und Platten mit pilgerschrittförmiger Bewegung des Werkstückes*“, Deutsches Reichspatent #59052, 1891.

Zu 7:

Das aktuelle χ -Verfahren des Eurocodes 3, so wie sein Vorgänger, das κ -Verfahren der DIN 18 800, sind in der Betrachtung differenzierter. s. Kapitel 5.5.3

⁴ Deutsches Reichspatent #34617, 1885

⁵ Deutsches Reichspatent #59052, 1891

⁶ Siehe: Euler: *lineas curvas*, E065, 1744

⁷ DIN 4114: Stabilitätsfälle, 1952

Das kreisrunde Hohlprofil aus duktilem Stahl ist als Halbzeug ein etabliertes Konstruktionselement, das in seinen genormten Ausführungen zum Standard bei Stabwerkskonstruktionen gehört, da sein Trägheitsradius bei reiner Druck- oder Torsionsbelastung am effektivsten ist. Es weist somit ein sehr hohes Maß an Kongruenz mit den Eigenschaften des idealen Modellstabs auf.

Der technologischen Darstellung von geraden Stabtragwerken wird in den Standardwerken zur Planung und Ausführung von Hohlprofilkonstruktionen im Hochbau ein großer Platz eingeräumt. Die Standardwerke von Wanke⁸, gefolgt von Dutta⁹, über Konstruktionen aus Stahlhohlprofilen gehen hauptsächlich auf den jeweils aktuellen Stand der Technik ein und richten sich handlungsorientiert an den planenden Ingenieur konventioneller Konstruktionen. Ergänzt werden diese Praxisleitfäden durch eine rege Forschungstätigkeit, deren nationale Beiträge in den einschlägigen Periodika veröffentlicht werden. Der internationale Austausch hat seinen Platz auf wiederkehrenden Symposien und Konferenzen, hier namentlich z.B. die *Tubular Structures*¹⁰, gefunden.

Entsprechen die Pfahlbauten und schließlich das Raumfachwerk aus Stahlhohlprofilen der klassischen Entwicklungsperspektive des steifen Stabes, können die Anforderungen, z.B. an Zeltstangen, in einer anderen Tradition gelesen werden. Das flexible Verhalten von Stäben kann in Randbereichen des Bauwesens vorteilhaft sein, wenn Verformungen zulässig sind und kleine Kräfte über große Distanzen geleitet werden sollen.

Diese Randbedingungen kann man in Teilbereichen des sogenannten Leichtbaus erkennen, der eine Optimierung des Gewichts in Bezug auf die Wirksamkeit einer Konstruktion zum Leistungsprinzip erhebt. Dennoch wurden im Formleichtbau überwiegend Strategien zur Knickstabilisierung von geraden, schlanken Stäben entwickelt, die den konventionellen Kriterien des Konstruierens entsprechen und dem großen Abstand zwischen zulässiger Traglast und theoretischer Knicklast aus Sicherheitsaspekten verpflichtet bleiben müssen.

Demgegenüber gibt es nur vereinzelte Ansätze bei Stabwerkskonstruktionen, die mit verformten, extrem schlanken Stäben geplant und projiziert wurden, die durch ein abweichendes Verformungs- bzw. Tragverhalten gekennzeichnet sind.

Es gibt nur wenige Autoren wie Frei Otto (1925-2015) und Robert Le Ricolais (1894-1977), die sich in Ansätzen für komplementäre

⁸ Wanke: Stahlrohrkonstruktionen, 1966

⁹ Dutta: Hohlprofil-Konstruktionen, 1999

¹⁰ Siehe: Shen/Chen et al.: Tubular Structures, 2008

Konstruktionslösungen aus extrem schlanken Stäben widmeten und Potentiale für ihre sinnvolle Anwendung in den Raum stellten. Erst die noch junge Arbeitsgruppe um Jan Knippers, Achim Menges und Jens Gengnagel mit dem Thema *Active Bending*¹¹, hat sich wieder mit der Untersuchung von Stabtragwerken und flächenhaften Tragelementen im stark elastisch vorverformten Zustand beschäftigt und erste Demonstratoren geplant und gebaut. Die Prototypen und Studienobjekte reichen dabei von Detaillösungen bis hin zu gebauten Rauminstallationen und selbstständigen Architekturen, wie z.B. Pavillonbauten.

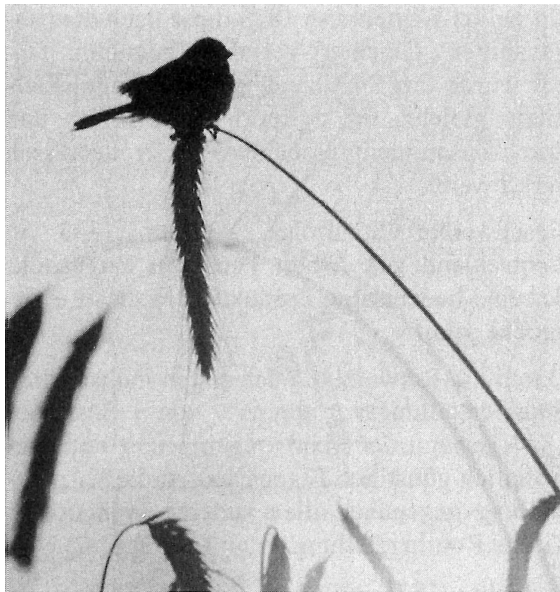


Abb. I. 1: Vogel auf einem Roggenhalm

Die zuvor skizzierte, implizite Dichotomie von Stäben im Kontext von Tragwerkselementen ist der Ausgangspunkt für eine kritische Betrachtung aus der Perspektive der Bautechnikgeschichte. Die Abb. I. 1, einer Einleitung für ein Standardwerk¹² zu Hohlprofilkonstruktionen im Stahlbau entnommen, kann in diesem Sinne als ein (un-)bewusster Hinweis auf die ursprüngliche Vielfalt des Tragverhaltens von Stäben verstanden werden.

Diese Arbeit will kritisch die historischen Entwicklungslinien, in den Aspekten Theoriebildung und Technologie untersuchen, die zum Verständnis von Euler-Stäben und ihrer Dominanz im konstruktiven Kontext, gegenüber den extrem schlanken und biegeweichen Stäben, beigetragen haben. Es soll über einen methodischen Zugang eine sinnvolle Erweiterung des Begriffes *Stab* erarbeitet werden, die den Rück-

¹¹ Lienhard/Alpermann et al.: *Active Bending*, 2013

¹² Dutta: *Hohlprofil-Konstruktionen*, 1999, S. 1

griff auf die Flexibilität, als ein ursprüngliches Wesensmerkmal von Stäben, gestattet, und so den *Stab* für komplementäre Konstruktionen im extrem schlanken Bereich erschließen helfen könnte.

Von besonderem Interesse sind hierbei die Entwicklungslinien hohler Konstruktionselemente aus Eisenwerkstoffen, wie z.B. Leitungsrohre und deren Berührungspunkte mit Tragstrukturelementen in Röhrenform, die Fragen nach den strukturellen Vorbildern aufwerfen.

1.1 Methodik

Der Begriff *Stab* wird hier im Kontext des Bauwesens als physisches Element der Makro-Maßstabsebene aufgefasst, das in Wechselwirkung zu seiner Theoriebildung zu stehen scheint. Es wird im ersten Abschnitt *Einleitung und Fragestellung* die induktive Methode des *Explizierens* nach Rudolf Carnap eingeführt, die durch semantische Reflexion die verschiedenen Bedeutungsebenen und ihre Merkmale herausstellen soll, um ein erweitertes Verständnis der Formen des Tragverhaltens wieder erschließen zu können.

Nach Durchgang der analytischen Abschnitte *Grundlagen*, *Vertiefung* und *Komplementär*, gestattet diese Methode die Überführung des Untersuchungsgegenstandes in einen wissenschaftlich fassbaren Begriff, das sogenannte *Explikat* im gleichnamigen letzten Abschnitt, der die Dichotomie des Tragverhaltens der Stäbe berücksichtigt.

In diesem letzten Abschnitt soll das geformte *Explikat* auf seine produktive Anwendbarkeit hin überprüft werden, indem ein Stab-Element mit seiner Hilfe entwickelt werden soll, das in seinem Tragverhalten von ordinären Knickstäben abweichen kann und ggf. nach den zuvor eingeführten Kriterien des Formleichtbaus kritisch zu bewerten ist.

1.1.1 Über den Abschnitt Grundlagen

Ausgangspunkt bilden die Untersuchungen zu den etymologischen Ursprüngen des Begriffs *Stab* bzw. seiner Synonyme, da vermutet werden kann, dass wesentliche Eigenschaften in der Wortbedeutung ursprünglich angelegt sind. Neben der universellen Mathematik ist es immer noch die Fachsprache eines Gebietes, die mit ihren Termini den Vorstellungsbereich aufspannt und begrenzt. Für den *Stab* soll die Bandbreite seines kontextuellen Gebrauchs im Bauwesen kritisch aufgezeigt werden, da hierüber auch Aussagen zu seiner Theoriebildung erschlossen werden.

Die Schlankheit von Stäben wird in diesem Kontext als ein grundlegendes Merkmal erkannt, und, wie bei den etymologischen Untersuchungen, als Begriffsentwicklung historisch aufgearbeitet. Sie ist von zentraler Bedeutung für das Verständnis des Niveaus der qualitativen Beschreibung und der quantitativen Bewertung des Tragverhaltens in jeder Epoche. Es wird vermutet, dass mit dieser fortschreitenden Theoriebildung, die im Ursprung angelegten dichotomen Aspekte des Tragverhaltens verloren gingen, und einseitig zugunsten der steifen Stäbe weiterentwickelt wurden.

Kapitel 5

Um die vermuteten Interdependenzen zwischen Theorie und Technologie untersuchen zu können, wird der Darstellung bzw. Produktion von Stab-Elementen nach genuinen und synthetischen Stäben unterschieden.

Kapitel 6

Den hohlen Stäben aus Eisenwerkstoffen kommt innerhalb der Gruppe der synthetischen Stäbe eine besondere entwicklungsgeschichtliche Bedeutung zu, da sie mit dem Aufkommen der ersten Gussstützen ein leistungsfähiges Tragwerkselement stellten, das bereits auf ein Spannungsfeld aus Empirie und Theorie zur Bemessung von steifen Druckstäben traf.

Eine Abgrenzung zu den Stäben des metaphysischen Bereichs, wie z.B. Zauberstab oder Zepter, erfolgt durch die Grenzbetrachtung im Exkurs über die Urhütte.

1.1.2 Über den Abschnitt Vertiefung

Im dritten Abschnitt, der den Hauptteil zur vertieften Untersuchung bildet, werden die technologischen Ursprünge und Entwicklungslinien offengelegt, die die hohlen Stäbe aus Eisenwerkstoffen mit den Leitungsröhren und formverwandten Hohlkörpern teilen. Es wird der Frage nachgegangen, warum die günstige Gestaltform des Kreisringquerschnittes erst spät Einzug in die konstruktiven Disziplinen fand und welche Aufgaben, abweichend vom steifen Druckstab, Rohre in der Tragwerksplanung erfüllten. Wird hierzu eine synoptische, chronologische Darstellungsform gewählt, erscheint folgend ein Perspektivwechsel notwendig zu sein, um die besondere Eignung und den Aspekt der Optimierung für steife Druckstäbe anhand der Gussstützen bzw. Stahlhohlprofile analysieren zu können. Hierzu werden Disziplinen außerhalb des Bauwesens mit einbezogen, da das Rohr als hohler Stab für die konstruktiven Fächer einen universellen Charakter zu besitzen scheint und somit Aspekte der Weiterentwicklung aus verschiedenen Richtungen vermutet werden, die zu einer Adaption im Bauwesen führten.

Kapitel 7

Kapitel 8 u. 9

1.1.3 Über den Abschnitt Komplementär

Kapitel 10

Der Ausgangsthese verpflichtet, dass die biegeweichen, extrem schlanken Stäbe im modernen Bauwesen zurzeit wenig Beachtung finden, werden Konstruktionen aus biegeweichen Stäben in Natur und Technik exemplarisch vorgestellt, und mögliche Anwendungsgebiete der hiermit befassten Pioniere wieder geben.

1.1.4 Über den Abschnitt Explikat

Kapitel 11

Die gewonnenen Erkenntnisse über die Dichotomie des Stabes sollen abschließend zur Grundlage genommen werden, um einen wissenschaftlich fassbaren Begriff im Sinne der induktiven Methode Carnaps zu diskutieren.

Kapitel 12

Das produktive Potential des Explikats soll im Folgenden überprüft werden. Es soll zunächst auf abstrakter Basis ein Stab-Element für Druckkräfte entwickelt werden, dessen vom Knickstab abweichendes Verformungs- und Tragverhalten auf theoretischer Grundlage zu beschreiben und mit ersten Tastversuchen an Demonstratoren abzugleichen ist.

Abbildungsverzeichnis Kapitel 1:

Abb. I.1: Vogel auf einem Roggenhalm. Aus: Dutta, Dipak: Hohlprofil-Konstruktionen.
Ernst & Sohn, Berlin, 1999, S. 1

2.0 *Explikandum Stab* – Entwicklungsgeschichte vom Stock zum Stab im Tragwerksmodell

Der *Stab* ist ein Oberbegriff, der im sprachlichen Gebrauch vielschichtig ist und erst im Kontext seiner Verwendung eine Schärfung seiner Bedeutung erfährt. Stäbe gibt es in der Natur und der Technik in einer Vielzahl von unterschiedlichen Ausprägungen, die sich hinsichtlich des Werkstoffs, der Formgebung des Materials, der Stabgesamtform, seiner Lagerung, und somit der Art der Belastung unterscheiden.

Im Folgenden sollen nur diese begrifflichen Bedeutungen dargestellt werden, die im Sinne des Bauwesens relevante Aspekte darstellen; diese Objekte können der Makro-Maßstabsebene zugeordnet werden. Es handelt sich hierbei einerseits um konkrete, materielle Objekte des Alltags, mit einem bautechnischen Bezug bzw. solche aus der Bauindustrie, andererseits um modellhafte Vorstellungen vom Stab im Kontext der Stabtragwerkstheorie bzw. ihrer Vorläufer.

Im Bauingenieurwesen ist mit dem anschaulichen Begriff *Stab* eine Reihe von Objekten und Modellvorstellungen zu diesen Objekten belegt, die in ihrer Verwendung vielschichtigen Konventionen folgen. Es ist daher für eine eindeutige Verständigung notwendig, den Kontext zu kennen und hilfreich weitere Attribute zu benennen, die erst eine eindeutige Einordnung im bautechnischen Kontext ermöglichen. So verweisen der Pendelstab oder der Torsionsstab beispielhaft auf eine modellhafte Vorstellung im Kontext eines statischen Systems, wohingegen der Viertelstab oder der Holzstab auf konkrete Bauelemente verweisen. Es wird der Vermutung nachgegangen, dass sich die Modellvorstellung aus den Eigenschaften der Stab-Objekte im bautechnischen Sinne historisch entwickelt hat und Apriori nicht zu einer definitiven Bestimmung im Bereich der Theorie führte.

In der einschlägigen Fachliteratur des Bauingenieurwesens wird die Modellvorstellung des Stabes auf eine Dimension, seiner Länge im euklidischen Raum, reduziert und ohne weitere Angaben als Gerade aufgefasst, die sich vektoriell einfach beschreiben lässt. Dieser Konvention folgend wird von einer Stabachse gesprochen, die sich bei der weiterführenden Bemessung auf die Schwerachse oder den Schubmittelpunktsachse realer Bauelemente beziehen lässt. Die Randbedingungen, Lagerung und Belastung des Stabes werden in einer Annäherung der tatsächlichen Situation erfasst und mit Tabellenwerten der Profile einem Bemessungsalgorithmus zugeführt. Die Theorie II. Ordnung, zur Beschreibung eines genäherten Verformungsverhaltens unter Last, ermöglichten so eine ausreichend genaue Vorhersage des tatsächlichen Bauteilverhaltens im Regelfall.

Die Abgrenzung zu verwandten linearen Bauteilen ist unterschiedlich stark ausgeprägt und lässt sich nicht widerspruchsfrei in eine Gesamtsystematik einordnen. Am Beispiel des Seils und des Biegebalkens kann die unvollständige Systematik gezeigt werden. So wird der Begriff des Seils synonym für lineare Tragelemente verwendet, die ausschließlich zur Normalkraftbeanspruchung auf Zug ausgelegt sind. In diesem Sinne sind in erster Linie Seile und Ketten gemeint, die dieser Ausschließlichkeit in der Baupraxis genügen. Aber auch massive Rundstäbe können bei entsprechender Schlankheit im konstruktiven Kontext so aufgefasst werden. Die Abgrenzung ist in diesem Beispiel eindeutig und verweist auf grundverschiedene Eigenschaften zu Stäben, die nur die Linearität mit den Seilen teilen. Der Biegebalken, oder auch ordinär Balken genannt, ist hingegen ein biegesteifer Stab, der im System der Stabtragwerksmodelle eine eigene Einordnung erfährt, die nicht widerspruchsfrei ist. Die Beanspruchung erfolgt hier vorwiegend auf Biegung und kann grundsätzlich einerseits durch Last und andererseits durch Randmomente erfolgen, wobei beim Biegebalken in erster Linie die Beanspruchung durch Last gemeint ist. Der Biegebalken lässt sich aber nicht mehr systematisch einordnen, wenn zusätzliche Beanspruchungen wie Torsion oder Normalkräfte sich überlagern. Die Einordnung als Stab mit reiner Biegebeanspruchung greift hier zu kurz.

Es ist der Frage nachzugehen, welche Eigenschaften, neben den offensichtlichen morphologischen, zum Verständnis eines prototypischen Stabes expliziert werden können, die den Möglichkeitsraum zutreffender erfassen als die konventionellen kontextgebundenen.

2.1 Explizieren

Rudolf Carnaps Methode des *Explizierens*¹, d.h. das Überführen eines unscharfen Begriffes, dem *Explikandum*, in einen wissenschaftlich fassbaren, dem *Explikat*, scheint hier geeignet, den etablierten Begriff des Stabes im Bauwesen zu hinterfragen. Eine Explikation des Begriffs *Stab* ist insoweit zielführend, als dass gezeigt werden kann, dass im Bauwesen keine engere Definition des Stabes vorliegt und die konventionelle Betrachtung sogar bestimmte Eigenschaften ausblendet.

Es wird im Folgenden zu zeigen sein, wie, historisch gesehen, aus dem realen Objekt *Stab* eine reduzierte, modellhafte Betrachtungsweise entwickelt wurde, die im Bauwesen aktuell vorherrschend ist und so den Blick auf weitere immanente Eigenschaften der realen, physischen Stäbe verstellt. Die Methodik zur Explikation wird von Carnap in vier Forderungen zusammengefasst: [sic]

¹ Carnap: Induktive Logik, 1959

- „1. Das Explikat muß dem Explikandum so weit ähnlich sein, daß in den meisten Fällen, in denen bisher das Explikandum benutzt wurde, statt dessen das Explikat verwendet werden kann. Eine vollständige Ähnlichkeit wird jedoch nicht gefordert; es werden sogar beträchtliche Unterschiede zugelassen.
2. Die Regeln für den Gebrauch des Explikates müssen in exakter Weise gegeben werden, so daß das Explikat in ein wohlfundiertes System wissenschaftlicher Begriffe eingebaut wird.
3. Das Explikat soll fruchtbar sein, d.h. die Formulierung möglichst vieler genereller Aussagen gestatten. Diese generellen Aussagen sind entweder empirische Gesetze, sofern es sich nämlich um einen nichtlogischen Begriff handelt, oder logische bzw. mathematische Lehrsätze im Falle logisch-mathematischer Begriffe.
4. Das Explikat soll so einfach als möglich sein, d.h. so einfach, als dies die wichtigeren Forderungen 1 bis 3 gestatten. Die Einfachheit ist hier in den beiden oben angegebenen Bedeutungen zu verstehen.“²

Im Folgenden werden daher Adäquatheitskriterien für den zu explizierenden Begriff *Stab* zu benennen sein, die eine systematische Einordnung aller Stäbe in Bezug auf den Archetyp des Stabes erlauben. Es handelt sich somit zunächst um ein klassifikatorisches Begriffsproblem, das im weiteren Verlauf in komparative und schließlich in quantifizierbare Begriffe überführt werden kann. Es ist für den aktuellen Diskurs zutreffend, wenn Rudolf Carnap verdeutlicht:

„Das Explikandum kann der Sprache des Alltags oder einem frühen Stadium der Wissenschaftssprache entnommen sein“³

– was für den Begriff *Stab* zutreffend ist, wie im Folgenden gezeigt werden kann.

² Carnap: Induktive Logik, 1959, S. 15

³ Carnap: Induktive Logik, 1959, S. 12

3.0 Herkunft und Bedeutung des Begriffs *Stab*

Etymologisch geht das Wort *Stab* auf die indogermanischen Wurzel *steb(h)*, was so viel wie stehend machen, aufstellen oder stützen bedeutet, zurück.^{1,2} Das Deutsche Wörterbuch der Brüder Grimm weist es als gemeingermanisches Wort aus und stellt auf über 39 Spalten eine Übersicht seiner kontextualen Bedeutungen zusammen.³ Die ursprüngliche Bedeutung des Gegenstandswortes wird wie folgend beschrieben:

„[sic] stab bezeichnet ein in die länge ausgedehntes stück holz von geringer, in der regel gleichmässiger dicke und meistens von rundem querschnitt, oder auch einen andern gegenstand von ähnlicher form“⁴

Weitere Eigenschaften werden mit steif und gerade in Zusammenhang gesetzt und zur Abgrenzung von Rute oder Gerte herangezogen.⁵

Im umgangssprachlichen Gebrauch ist der Stab synonym mit Stecken, Stiel, Stock und Stange verbunden.^{6,7,8} Der historische Wortstamm und der Gebrauch seiner Synonyme verweisen auf eine Anschaulichkeit dieses archetypischen Körpers, der schon in der Frühphase der Menschheit eine konkrete Relevanz besaß. Spätestens der *homo erectus* (s. Abb. VII.3) fand folglich in der Natur stabförmige Elemente im menschlichen Maßstab vor, die sich früh einer anthropogenen Verwendung zuführen ließen, und prägte hierfür eigene Begriffe.

Die etymologische Betrachtung verdeutlicht, dass es sich beim Stab um einen Begriff handelt, der inhaltlich zwei Dimensionen umfasst: die Morphologie und die Materialität derselben. Aus der Anschauung heraus war die Trennung von Morphologie und Materialität zunächst nicht notwendig. Die Gestaltfestigkeit war zunächst untrennbar mit der Geometrie verschränkt.

3.1 Die Abstraktion des Stabes in der Konstruktion

Erst mit der wissenschaftlichen Betrachtung wurde ein differenziertes Verständnis erschlossen, das eine Trennung von Morphologie, beschreibbar durch die Geometrie, und der Materialität zielführend erscheinen lässt und die bildhafte Vorstellung ablöste (Abb. III. 1 linker Ast). Kennzeichnend hierfür war die abstrakte Vorstellung von Kräften, die die Zweckerfüllung des Stabes einer analytischen Betrachtung

Zu ⁵:

Wörtlich heißt es dazu im Herkunftswörterbuch der Dudenreihe: „Das Wort <Stab> zeigt nur im Aisl. die Bedeutung „Pfeiler“, sonst bezeichnet es einen glatten, meist runden Stock, der besonders als Stütze oder Amtsabzeichen verwendet wird[...]“

Zu ⁷:

Im Bedeutungswörterbuch der Dudenreihe wird folgende Beschreibung unter anderem gegeben: „[...]meist runder, verhältnismäßig dünner und nicht sehr langer, einem Stock ähnlicher Gegenstand aus unterschiedlichem hartem Material (z.B. Holz, Metall)[...]“

Zu ⁸:

Für den Stock lässt sich der sinnverwandte Zusammenhang schon an seinem althochdeutschen Wortstamm *stoc* aufzeigen, was mit abgeschlagenem Ast in Zusammenhang gebracht wird.

¹ Siehe: Dudenredaktion: Das Herkunftswörterbuch, 2007, S. 329

² Grimm/Grimm: Deutsches Wörterbuch, Bd. 10, 1984, S. 330 ff

³ Siehe: Grimm/Grimm: Deutsches Wörterbuch, Bd. 10, 1984

⁴ Grimm/Grimm: Deutsches Wörterbuch, Bd. 10, 1984, S. 330 II

⁵ Dudenredaktion: Das Herkunftswörterbuch, 2007, S. 796

⁶ Siehe: Grimm/Grimm: Deutsches Wörterbuch, Bd. 10, 1984, S. 330 ff

⁷ Dudenredaktion: Das Bedeutungswörterbuch, 2010, S. 880

⁸ Siehe: online: www.duden.de/Stab

zuführte. Bei der Kraftübertragung mittels eines Stabes zwischen zwei Punkten kann ein zweistufiges Verständnis aufgezeigt werden (Abb. III. 1 rechter Ast): in einem ersten Schritt der bedingten Abstraktion kann der Frage nachgegangen werden, welche Materialien können bei gegebener Form welche Kräfte übertragen.

Dankert & Dankert sind in ihrer Abstraktion sogar noch allgemeiner, wenn sie definieren:

„Ein Stab ist in einem System starrer Körper mit genau zwei Gelenken mit anderen Teilen des Systems verbunden. Nur über diese Gelenke werden Kräfte in den Stab eingeleitet.“⁹

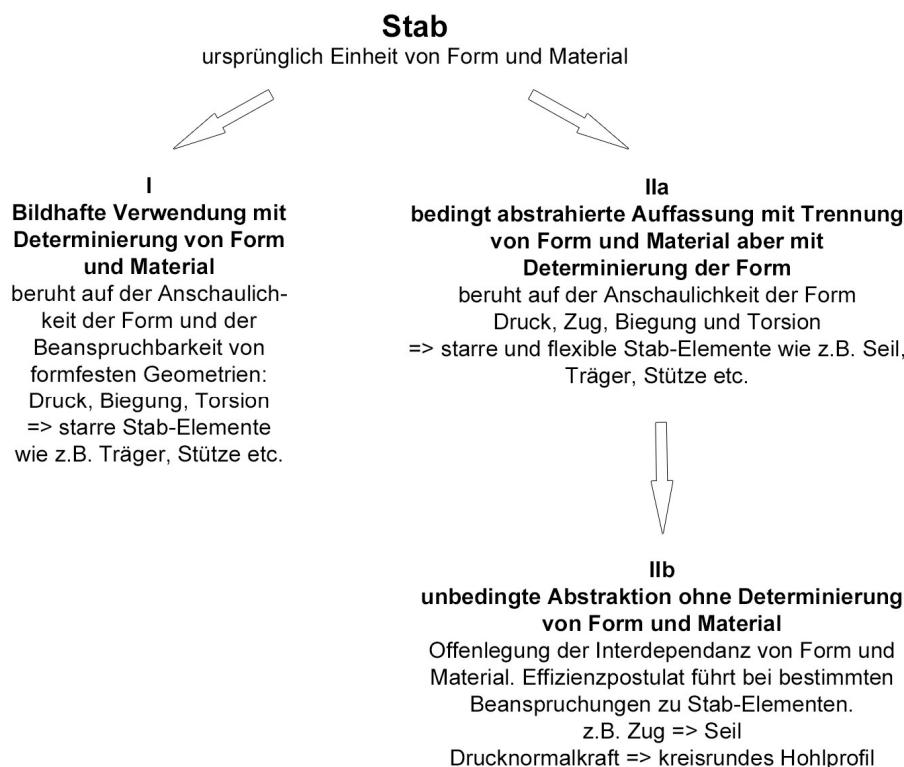


Abb. III. 1: Abstraktionsstufenmodell des Stabes im Bauwesen

Der Stab wird hier nicht geometrisch annähernd determiniert. Einer Determinierung steht die Erkenntnis zuvor, dass die Geometrie erheblichen Einfluss auf die Effektivität des Materials bei der Kraftübertragung hat (Abb. III. 1). So ist zum Beispiel die Geometrie bzw. die Gestaltform eines auf Torsion beanspruchten Elementes deutlich unterschiedlich zu dem eines auf Zug beanspruchten. Ein weiterer Aspekt ist die Angemessenheit der Modellbildung.

Ausgehend vom Feld der Physik wird die Statik als Teilgebiet der Mechanik, genauer als Sonderfall der Dynamik, verortet.

⁹ Dankert/Dankert: Technische Mechanik, 2013, S. 70

Die zu beobachtenden Phänomene werden in den Dimensionen Raum und Zeit notiert. Die räumliche Dimension kann zutreffend im euklidischen, dreidimensionalen Raum abgebildet werden, wonach jede reale Struktur grundsätzlich über drei Dimensionen verfügt. Die Reduktion von dreidimensionalen Strukturen wird wie folgt begründet:

„Im Raum-Zeit-System werden mechanische Phänomene überwiegend durch Anfangs-Randwertprobleme mathematisch beschrieben, d.h. durch Lösungen von Differenzialgleichungen für geeignete Anfangs- und Randbedingungen. Der Lösungsaufwand für derartige dreidimensionale Anfangs-Randwertprobleme ist außerordentlich hoch. Zu seiner Reduzierung finden in der Mechanik, vor allem in der Statik der Tragwerke, überwiegend idealisierte Tragelemente mit niedrigerer Dimensionszahl Verwendung. Viele Tragelemente füllen eben Teilräume des $E3$ (Anm.: Euklidischer Raum mit drei Dimensionen) aus, welche näherungsweise flächenhaft [...] oder sogar linienhaft [...] gestaltet sind, je nach der Dominanz zweier Abmessungen oder einer.“¹⁰

Die Autoren sprechen hier bei eindimensional determinierten Tragelementen von Linienträgern oder Stäben. Mit gerader Stabachse werden Balken und Fachwerkstäbe abstrahiert, und mit gekrümmter Stabachse der Bogen und das Seil.

Die Werke zur Statik und Technischen Mechanik sind in ihrem Ansatz theorielastiger und zunächst werkstoffungebunden, aber häufig deterministisch in ihrer Geometrieauffassung. Hier zum Beispiel ist das Grundlagenbuch für die Lehre von Dieter Dinkler, *Grundlagen der Baustatik – Modelle und Berechnungsmethoden für ebene Stabtragwerke*,¹¹ zu nennen. So wird im Kapitel Tragwerksmodelle der Statik übereinstimmend geäußert, dass:

„Die in der Baustatik zu analysierenden Tragwerke sind oft so gestaltet, dass ihr Trag- und Verformungsverhalten ausreichend genau über das Verhalten einer Referenzachse bei Stabtragwerken [...] beschrieben werden kann.“¹²

Im Folgenden werden von Dinkler für gerade Stabtragwerke genannt:¹³ Balken (Biegung), Stützen (Druck) und Seile (Zug); die zu Tragwerken, wie Fachwerke, biegesteife Rahmen und Trägerroste zusammengesetzt werden können. Das Verhältnis von Länge zu Breite/Höhe eines unteren Grenzmaßes für Stäbe wird unkommentiert mit eins zu vier angegeben. Diese Idealisierung umfasst in einem weiteren, eigenständigen Gliederungspunkt auch gekrümmte Stabtragwerke, unter denen Bogentragwerke hier verstanden werden.

¹⁰ Krätzig/Wittek: Tragwerke 1, 1990, S. 2f

¹¹ Siehe: Dinkler: Grundlagen der Baustatik, 2012

¹² Dinkler: Grundlagen der Baustatik, 2012, S. 14

¹³ Dinkler: Grundlagen der Baustatik, 2012, S. 14

Diesen Ansatz verfolgte schon Szabó in seinem älteren Standardwerk *Einführung in die Technische Mechanik*.¹⁴

Die Publikationen zur Tragwerkslehre haben schon einen deutlichen Bezug zur Materialität und können als Vermittler zu den konstruktiven Disziplinen Holz-, Stahl- und Stahlbetonbau verstanden werden. Die Spezifizierung des Materials ist in diesen angewandten Wissenschaften an konkrete Geometrien der Tragelemente gebunden. Sie setzen ein grundlegendes Verständnis des Stabes als Modell der gebauten Umwelt voraus. Das Stab-Modell wird im Rahmen der aufsteigenden Modellbetrachtungen von Theorie Erster Ordnung nach Theorie Dritter Ordnung in seinem idealisierten mechanischen Verhalten differenziert, wobei nach Meinung Petersens¹⁵ die Theorien Erster und Zweiter Ordnung die deutliche Mehrheit der zu betrachtenden Fälle im konstruktiven Ingenieurbau abdecken.

Die Tragwerkslehre für Architekten bedient sich einer konkreteren Kategorisierung nach den Aufgaben von Haupttragelementen im Hochbau und bleibt einer umgangssprachlichen Anschaulichkeit verbunden.

In seinen Schriften zur Einführung in die Tragwerkslehre für Architekten, entwickelt Walther Mann¹⁶ eine Begriffssystematik, die unter dem Begriffspaar Stäbe/Träger alle stabförmigen Elemente subsummiert, die vorwiegend eindimensional ausgebildet sind. Leicher¹⁷ geht in seiner Begriffssystematik von der Funktion der stabförmigen Tragwerkselemente aus. Seiner Auffassung nach finden stabförmige Elemente bei Tragwerken in den vier Grundaufgaben Überspannen, Stützen, Aussteifen und Gründen Anwendung. Ein Rückschluss auf die inneren Schnittkräfte ist nach dieser Aufzählung nicht mehr möglich, da zum Beispiel das Überspannen durch Biegung oder Zugkräfte realisiert werden kann.

Eine transparente Einführung in die Modellierung ist bei Krätzig und Wittek zu finden, die an das Grundstudium im Bauingenieurwesen adressiert ist.¹⁸ Die Autoren unterscheiden zwischen gerader, in einer Ebene und im Raum gekrümmte Stabachsen, und ordnen in einer Matrix (Abb. III. 2) die zugehörigen Schnittkräfte zu; wobei die Torsion mit erfasst wird.

¹⁴ Siehe: Szabó: Technische Mechanik, 1975

¹⁵ Petersen: Stahlbau, 2013, S. 157

¹⁶ Siehe: Mann: Statik und Festigkeitslehre, 2007, S. 37

¹⁷ Siehe: Leicher: Tragwerkslehre, 2010, S. 1

¹⁸ Siehe: Krätzig/Wittek: Tragwerke 1, 1990, S. 59f

Beanspruchung	Schnittgrößen	Stabachse	
		gerade	gekrümmt
einachsig	N	Fachwerkelement	Seilelement Bogenelement
eben	$N \ Q \ M$	Balkenelement	Bogenelement
räumlich	$N \ Q_y \ Q_z \ M_T \ M_y \ M_z$		

Abb. III. 2: Bezeichnung von Stabelementen und zugeordneter Schnittgrößen nach Krätzig & Wittek

Büttner & Hampe¹⁹ haben eine umfangliche Präzisierung der Begriffe vorgeschlagen, die den Stab als physische Entität und Modell sinnvoll einordnet. Der Stab wird in dieser Systematik als Linienelement der Tragwerksstrukturelemente erfasst, das biegeweich oder biegesteif in den Geometrien gekrümmt als auch gerade vorliegen kann, und in Variationen von Materialität und Querschnittsgeometrien als Tragwerkelement in Erscheinung tritt.

Im anschließenden Kapitel wird diese Systematik von Büttner & Hampe eingeführt, um im Folgenden gebaute Beispiele, Planungen und Modelle in konsistenter Sprache analysieren und beschreiben zu können und eine sinnvolle Erweiterung des Begriffs im Sinne des Explizierens überprüfen zu können.

¹⁹ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 1, 1977 u. Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985

Abbildungsverzeichnis Kapitel 3:

Abb. III. 1: Abstraktionsstufenmodell des Stabes im Bauwesen. Aus: Verfasser

Abb. III. 2: Bezeichnung von Stabelementen und zugeordneter Schnittgrößen nach Krätzig & Wittek. Aus: Krätzig, B. Wilfried u. Udo Wittek: Tragwerke 1 : Theorie und Berechnungsmethoden statisch bestimmter Stabtragwerke. Springer-Verlag, 1990, S. 59

4.0 Einführung in die Begrifflichkeiten von Büttner & Hampe

Das Bestreben, Phänomene oder Gedanken zu systematisieren, ist im menschlichen Denken anscheinend angelegt. Eine Systematik hilft sowohl der eigenen Orientierung als auch bei der Kommunikation; sie kann aber bei einem hoch entwickelten Niveau mehr leisten: Dort wo sie in Widerspruch gerät, ihre Konsistenz verliert oder zur Aufnahme neuer Aspekte nicht geeignet ist, indiziert sie Forschungspotenziale.

Das Bauwesen ist in seinen Bezeichnungen traditionell geprägt und wenig analytisch im Umgang mit seinen Begriffen, da diese häufig nur kontextual zur Synthese angewendet werden. Die Autoren Oskar Büttner (1930-2017) und Erhard Hampe (1928-1998) haben mit großer Kenntnis, der dem Bauwesen eigenen Denkweise und Sprache, eine Systematik entwickelt, die die Kommunikation zwischen Architekt und Bauingenieur präzisieren helfen soll. Als Prämisse des schöpferischen Handelns sehen sie die Fähigkeit, die Tragstrukturen und Tragwerke der natürlichen und gebauten Umwelt in konsistenter Sprache analysieren zu können. Die hierfür definierten Begriffe dienen hiernach bei der Synthese neuer Bauten. Dieser umfassende Ansatz wird von den Autoren wie folgend begründet:

„1. In der Vergangenheit sind aus unterschiedlichen Berufszweigen, unterschiedlichen Gesichtspunkten und mit unterschiedlicher Begriffspräzision zahlreiche Bezeichnungen, Begriffe und Definitionen gebildet worden, die einen festen Platz in der Fachsprache des Ingenieurs und des Architekten gefunden haben, obwohl ihr Inhalt oft nicht genügend klar gegeneinander abgegrenzt, teilweise auch mit gegensätzlicher Bedeutung versehen wurde.

2. In den letzten Jahren ist die Ordnung von Begriffssystemen im Zusammenhang mit der Entwicklung von Projektierungstheorien und -methoden, mit der Herausbildung von Modellbildungs-, Entscheidungs- und Systemtheorien auf eine Höhe gehoben worden, die zunehmende wissenschaftliche und logische Geschlossenheit von Begriffssystemen möglich macht und fordert. [...] Begriffe wie Tragwerk, Tragsystem, statisches System, Tragkonstruktion, Bauwerk, Baukonstruktion, Strukturform, Strukturschema sind in der Fachsprache von Architekten und Ingenieuren fest verankert und teilweise durch bedeutende Baumeister unserer Zeit mit individuellen Inhalt und spezifischer Bedeutung belegt worden.“¹

Die Autoren messen der Präzisierung der Begriffe eine Bedeutung in der Kommunikation von Architekten und Ingenieuren bei, ohne dabei die bisher gebräuchlichen, häufig historisch gewachsenen Begriffe dis-

Anm.:

Andere Autoren begannen ab den 1960er Jahren mit der systematischen Darstellung von Tragstrukturen und ihren Modellen. Hier sind zu erwähnen Kurt Siegel (1911-2004), siehe: Siegel: Strukturformen, 1960 und Heino Engel (*1925), siehe: Engel: Tragsysteme, 1967

Zu ¹:

Hier werden von den Autoren E. Torroja (1899-1961), P. L. Nervi (1891-1979), C. Siegel (1911-2004) und H. Engel (*1925) zitiert. Vgl.: Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 1, 1977, S. 15

¹ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 1, 1977, S. 10

kreditieren zu wollen. Ihr Ansatz stützt sich auf die Methodik der Systemtheorie, wonach das Bauwerk als System aufgefasst werden kann, das in Wechselwirkung mit seiner Umwelt steht (Abb. IV. 1).

„So erschließt eine Analyse des Systems Bauwerk unter dem Aspekt des Tragens das Tragsystem.“²

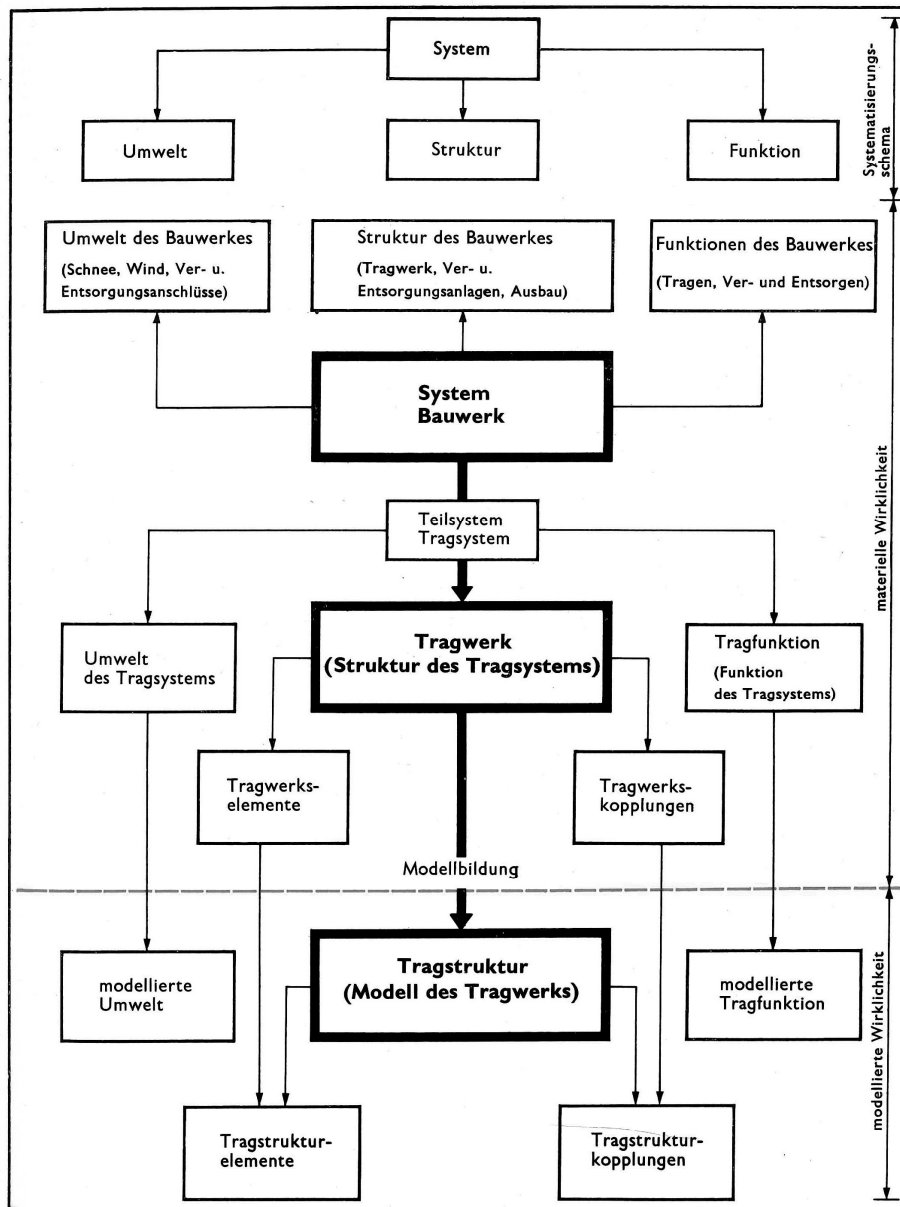


Abb. IV. 1: Diagramm zur Modellbildung, Büttner & Hampe

² Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 1, 1977, S. 10

Tabelle IV. 1: Begriffsdefinitionen nach Büttner & Hampe mit Ergänzung und Beispielen des Autors, hier kursiv markiert

Begriff nach Büttner & Hampe:	Definition:	Beispiel
Bauwerk	Ist Teil der gebauten Umwelt mit relativer Selbstständigkeit seiner Funktion und Erscheinungsform	<i>Turm mit Aussichtsplattform in Holzbauweise mit Holzverschalung</i>
Tragwerk	Ist Teil eines Bauwerks, der die zur Sicherung der Bauwerksfunktion erforderliche Tragfunktion übernimmt	<i>Holzkonstruktion aus Rundholz</i>
<i>Tragwerkselement</i>	<i>Ist Teil eines Tragwerkes, das über Kopplungen (Gelenke u.a.) an andere Tragwerkselemente angeschlossen ist. Im Sonderfall kann ein Tragwerk aus einem Element bestehen</i>	<i>Rundholz als Strebe oder als Stütze</i>
Tragsystem	Ist die aus dem Tragwerk, seiner Umwelt und seiner Funktion gebildete Einheit von Tragwerkselementen, Tragwerkskopplungen und der innerhalb des Tragwerkes und zur Umwelt vorhandenen Wechselwirkungen zur Realisierung der Tragfunktion	<i>Punkt-, Flächen und Linienlasten, Momente, Stäbe, Knoten, Auflager</i>
Tragstruktur	Ist ein unter dem Aspekt der Tragfunktion abstrahiertes Modell des Tragwerkes	<i>Ideelles Fachwerk</i>
Statisches System	Ist eine zum Zweck der quantitativen Untersuchung durch geometrisch-stoffliche Angaben präzierte Tragstruktur	<i>Nadelholz, Querschnitte versch. Verbindungsmittel aus Stahl</i>
Tragstrukturelement	Ist ein Teil einer Tragstruktur, der über Kopplungen (Gelenke u.a.) an andere Tragstrukturelemente angeschlossen ist. Im Sonderfall kann eine Tragstruktur aus einem Element bestehen	<i>Stab</i>
Tragfunktion	Ist die Aufgabe des Tragwerkes, Kräfte und andere Wirkungen aufzunehmen, weiterzuleiten, umzulenken und abzugeben	<i>Tragen der Aussichtsplattform, Eigengewicht u. Windlasten</i>
Tragqualität	Ist die Integration der zur Realisierung von Tragfunktionen wesentlichen Eigenschaften der Tragstruktur	<i>Aufnahme von Druck und Zugkräften</i>
Tragverhalten	Ist der konkrete Ausdruck der Tragqualität einer Tragstruktur für vorgegebene Kräfte und andere Wirkungen	<i>Normalspannungen, Stabilitätsproblem Knicken</i>

Der Verfasser möchte ergänzend den Begriff des *Tragwerkselementes* hervorheben, der in Publikation von Büttner & Hampe nicht in die definitorische Aufzählung fällt und hier der Tabelle IV. 1 in kursiv beigelegt ist; er ist erst in der zweiten Publikation über die Klassifizierung im

Schaubild³ Tafel 1.1.1. enthalten. Es ist gewissermaßen die Analogie zum *Tragstrukturelement* nach der Modellbildung von Büttner & Hampe.

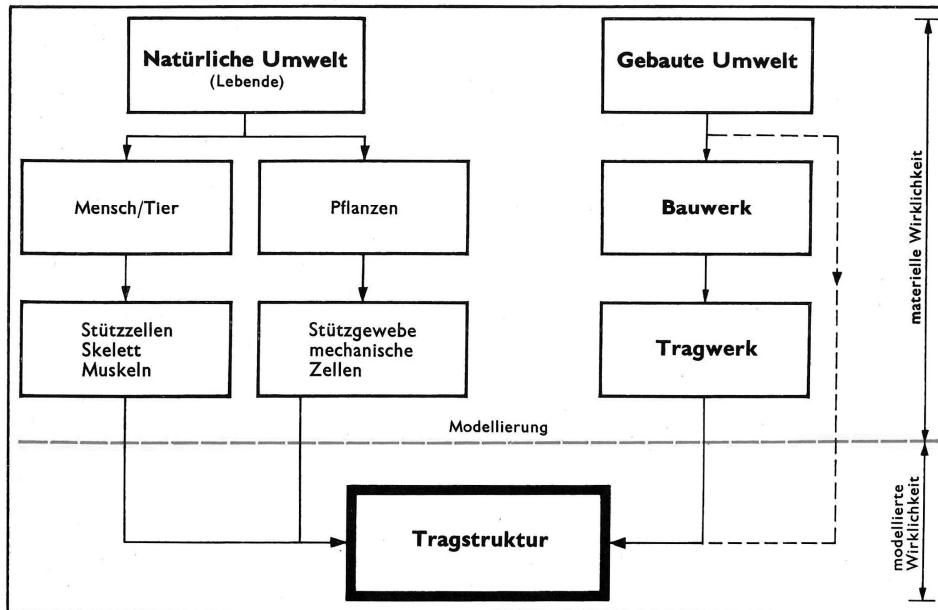


Abb. IV. 2: Tragstrukturen in der natürlichen u. gebauten Umwelt, Büttner & Hampe

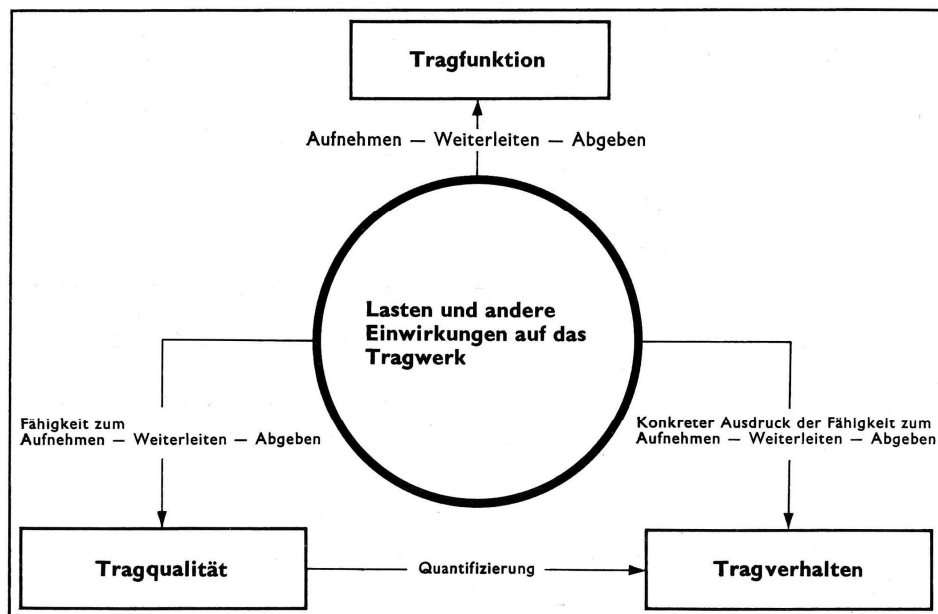


Abb. IV. 3: Einwirkungen auf das Tragwerk, Büttner & Hampe

³ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985, S. 11























































			Flächenelemente				Linienelemente			
			biegesteif		biegeweich		biegesteif		biegeweich	
				 Platte						
Linienlemente	biegeweich									
										
	biegesteif									
										
Flächenelemente	biegeweich									
										
	biegesteif									
										
										
<div>Tragstrukturen aus <i>gleichartigen</i> Strukturelementen zusammengesetzt.</div>										
<div>Tragstrukturen aus <i>verschiedenartigen</i> Strukturelementen zusammengesetzt.</div>										

Abb. IV. 4: Kombinatorik von Tragstrukturelementen, Büttner & Hampe

Büttner & Hampe konstatieren selbst eine Entwicklung hin zur Kombination von unterschiedlichen Tragstrukturelementen, deren Tragqualität gegenüber den Grundformen verändert ist und durch neue oder zusätzliche Kriterien gewertet werden muss.⁴ Sie sprechen dann von *Tragstrukturen 3. Art*:

„Entstanden durch Kombination zweier qualitativ unterschiedlicher Elemente oder Elementgruppen und vereinigen mindestens zwei Tragstrukturelemente unterschiedlicher Tragqualität in sich.“⁵

⁴ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 1, 1977, S. 11

⁵ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985, S. 16

Es werden von Büttner & Hampe zur grundsätzlichen Beurteilung der Tragqualität folgende Kriterien genannt:⁶

- *Schnittkraft- und Formänderungsverhalten unter statischer Belastung*
- *Schnittkraft- und Formänderungsverhalten unter dynamischer Belastung*
- *Stabilitätsverhalten*
- *Verhalten beim Erreichen von Grenzzuständen*

Der Stab wird hiernach in Abb. IV. 4 als biegesteifes Linienelement eingeordnet. Sein spezifisches Charakteristikum wird von Büttner & Hampe in seiner geraden Achse gesehen, die ihn vom Bogen abgrenzt; beide Zuordnungen verbleiben aber in der zweidimensionalen Ebene und entsprechen somit der überwiegenden Mehrheit von Anwendungsfällen im Bauwesen. Dem gegenüber stehen die biegeweichen Linienelemente, das gerade und das gekrümmte Seil, die entsprechend ihrer Formfindungseigenschaften nur in einer Ebene sich konstituieren können.

Diese hoch entwickelte Systematik wird in der vorliegenden Arbeit angewendet, um die Beispiele von Tragwerken bzw. Tragwerkselementen und Tragstrukturen bzw. Tragstrukturelementen konsistent zu bezeichnen, und anhand der Grenzen dieser Systematik die Potenziale extrem schlanker Stäbe mit eingepprägter Vorverformung als Forschungsfrage zu identifizieren. Fruchtbar wird diese Grenzüberschreitung im Zusammenhang mit dem Explizieren, wo die Möglichkeit der funktionalen und begrifflichen Einordnung für den Forschungsgegenstand gesehen wird.

In den folgenden Kapiteln werden die Eigenschaften des Stabes auf Grundlage dieser Annäherung expliziert; beginnend mit der geometrischen Determinierung der Form.

Anm.:

Implizit wird hier der Bogen als spannungsfreies Element betrachtet, das seine Form ohne Aufrechterhaltung äußerer Randbedingungen dauerhaft erhält.

⁶ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985, S. 17

Tabellenverzeichnis Kapitel 4:

Tabelle IV.1: Begriffsdefinitionen nach Büttner und Hampe mit Ergänzung und Beispielen des Autors, hier kursiv markiert. Aus: Büttner, Oskar u. Erhard Hampe: *Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur* : Bd. 1, Gerd Hatje, Stuttgart, 1977, S. 10-11

Abbildungsverzeichnis Kapitel 4:

Abb. IV.1: Diagramm zur Modellbildung, Büttner & Hampe. Aus: Büttner, Oskar u. Erhard Hampe: *Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur: Klassifizierung-Tragqualität-Bauwerksbeispiele*. Verl. für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1985, S. 11

Abb. IV.2: Tragstrukturen in der natürlichen u. gebauten Umwelt, Büttner & Hampe. Aus: Büttner, Oskar u. Erhard Hampe: *Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur: Klassifizierung-Tragqualität-Bauwerksbeispiele*. Verl. für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1985, S. 12

Abb. IV.3: Einwirkungen auf das Tragwerk, Büttner & Hampe. Aus: Büttner, Oskar u. Erhard Hampe: *Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur: Klassifizierung-Tragqualität-Bauwerksbeispiele*. Verl. für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1985, S. 12

Abb. IV.4: Kombinatorik von Tragstrukturelementen, Büttner & Hampe. Aus: Büttner, Oskar u. Erhard Hampe: *Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur: Klassifizierung-Tragqualität-Bauwerksbeispiele*. Verl. für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1985, S. 18

5.0 Abgrenzungskriterien des physischen Stabes – geometrische Größen und Proportionen

Gemäß des dargelegten Abstraktionsschrittes *Ila*, der Abb. III.1 im Kapitel 3, wird im Folgenden die Bandbreite der determinierten Form anhand von Proportionsbeschreibungen vorgestellt. Der physische Stab als Tragwerkselement ist eine Entität mit einer deutlich größeren Ausdehnung einer gerichteten Länge im Verhältnis zu seiner Breite und Tiefe, wobei Breite und Tiefe im Verhältnis 1:1 genähert sind und im kreisrunden Querschnitt den prototypischen Ausdruck finden. Die Literatur kennt keine durchgängige, eindeutige Abgrenzung der geometrischen Verhältniszahlen zur Proportionsbeschreibung, sowohl was das Längenverhältnis zur zweiten und dritten Dimension als auch deren Verhältnis untereinander betrifft. Allen Literaturangaben ist aber gemein, dass eine Formfestigkeit implizit vorausgesetzt wird, die Schläuche, Ketten und Seile ausschließt.

So geben Meskouris & Hake die Relation mit $h \ll l; b \ll l$ an¹, die identisch bei Leicher² genannt wird. Dinkler³ nennt das Verhältnis 1:4 von Höhe und Breite eines Querschnitts zu seiner Länge. Die Autoren Krätzig & Wittek⁴ geben dagegen ein Verhältnis von $\frac{d}{l} \cong \frac{b}{l} \ll 1$ an.

Müller & Alles⁵ nennen für Biegebalken gar einen Richtwert von $\frac{1}{d} \geq 2$, um sie von wandartigen Trägern abzugrenzen.

Die Autoren Dankert & Dankert lassen eine dimensionsgebundene Definition hinter sich und definieren den Stab als Tragstrukturelement folgendermaßen:

*„Ein Stab ist in einem System starrer Körper mit genau zwei Gelenken mit anderen Teilen des Systems verbunden. Nur über diese Gelenke werden Kräfte in den Stab eingeleitet.“*⁶

Eine Abgrenzung länglicher Bauelemente, wie zum Beispiel Latte, Kantholz, Brett, Bohle und Balken, ist aber insoweit gegeben, als dass hier in der einschlägigen Fachliteratur die minimalen Verhältniszahlen dieser stereometrischen Körper genau festgelegt sind.⁷ Die Länge wird im Wesentlichen hier durch Herstellungs- und Transportmaße beschränkt.

Zu 7:

Kanthölzer sind Schnitthölzer von quadratischem oder rechteckigem Querschnitt mit Querschnittsseiten von mindestens 6 cm. Das Verhältnis der Querschnittsseiten liegt unter 1:3. Kanthölzer, deren größte Querschnittsseite 20 cm und mehr beträgt werden auch als Balken bezeichnet. Bohle, 40 bis 100 mm dickes, mindestens 120 mm breites Schnittholz, besäumt oder unbesäumt. Brett, Bauschnittholz von mindestens 8 cm Breite und mindestens 5 mm Dicke; die kleinere Querschnittsseite ist kleiner oder gleich 1/3 der größeren.

¹ Meskouris/Hake: Statik der Stabtragwerke, 1999, S. 3

² Leicher: Tragwerkslehre, 2010, S. 2

³ Dinkler: Grundlagen der Baustatik, 2012, S. 31

⁴ Krätzig/Wittek: Tragwerke 1, 1990, S. 59

⁵ Siehe: Müller/Alles: Grafische Statik, 2003, S. 47

⁶ Dankert/Dankert: Technische Mechanik, 2013, S. 70

⁷ o.A.: Begriffe aus dem Bauwesen, 1963, S.110, S. 83 u. S. 84

Die zuvor genannten Proportionen gehen von den zutreffenden Beschreibungen massiver, homogener Körper aus und werden vereinfachend als umhüllende auf inhomogene und offene oder hohle Körper übertragen, wie sie z.B. gleichermaßen bei Hölzern, Knochen und Bauprofilen vorkommen, deren spezifische Abweichungen vom idealen Körper aus dem Kontext erschlossen werden müssen oder gegebenenfalls durch die explizite Nennung des Attributs sichergestellt werden. Diese Differenzierung ist z.B. im mittelhochdeutschen Sprachgebrauch schon angelegt, wenn das Blasrohr zur Vogeljagd als *holer stap*⁸ beschrieben wird.

Die angeführten Beispiele aktueller Autoren (Tabelle V. 1) zeigen aber, dass die Zuordnung von Tragwerkselementen auf Grundlage äußerer bzw. umhüllender geometrischer Eigenschaften zunächst eine sinnvolle Orientierung gibt, um das grundsätzliche Tragverhalten einordnen zu können; auch wenn hierfür eine weitere Kontextualisierung zwingend erforderlich bleibt.

Tabelle V. 1: Proportionsangaben für Stäbe verschiedener Autoren

Autor:	Proportionsverhältnis	Kommentar:
Meskouris & Hake; Leicher; Dinkler	$h \ll l; b \ll l$	
Dinkler	1:4	Breite/Höhe zu Länge
Krätzig & Wittek	$\frac{d}{l} \cong \frac{b}{l} \ll 1$	
Müller & Alles	$\frac{1}{d} \geq 2$	
Dankert & Dankert	proportionslos	
Büttner & Hampe ⁹	$H > \frac{1}{5}L$	Ein Flächenträger wird Scheibe genannt, wenn im Gegensatz zum Linienträger, dem Balken, die Konstruktionshöhe H größer als $\frac{1}{5}$ der Spannweite L wird
Büttner & Hampe ¹⁰	Abmessung in zwei Richtungen – klein im Verhältnis zur Ausdehnung in der Stabachse $b \cong d < l$	

⁸ Grimm/Grimm: Deutsches Wörterbuch, Bd. 10, 1984, S. 332 f

⁹ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 1, 1977, S. 140

¹⁰ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985, S. 365

Die Querschnittserfassung in geometrisch höherer Ordnung ist dabei Voraussetzung für wesentliche Aussagen zur Vergleichbarkeit der Steifigkeit der stabförmigen Elemente bei gleichen Werkstoffkennwerten. Die geometrischen Querschnittskennwerte lassen sich systematisch über die ansteigende Ordnung der Flächenintegrale beschreiben:

- 1.) Flächenmoment nullten Grades = Querschnittsfläche:

$$\text{Gl. V. 1} \qquad A = \int_A dA$$

- 2.) Flächenmoment ersten Grades = Statisches Moment zur Bestimmung des Schwerpunktes:

$$\text{Gl. V. 2} \qquad S_y = \int_A z \, dA$$

$$\text{Gl. V. 3} \qquad S_z = \int_A y \, dA$$

- 3.) Flächenmoment zweiten Grades = Flächenträgheitsmoment:

$$\text{Gl. V. 4} \qquad I_y = \int_A z^2 \, dA$$

$$\text{Gl. V. 5} \qquad I_z = \int_A y^2 \, dA$$

5.1 Schlankheiten von Stäben

Im Folgenden kann gezeigt werden, wie ein umgangssprachlicher, komparativer, morphologischer Begriff in einen exakten *terminus technicus* transformiert wurde, der unter Berücksichtigung von Randbedingungen, wie der Lagerung und Lasteinleitung, einen quantifizierbaren Vergleich des mechanischen Verhaltens bei zentrischer Druckbelastung in Längsrichtung ermöglicht. Ausgehend von trivialen Proportionsbeschreibungen aus der Anschauung/Schätzung oder einfacher direkter Messung von Strecke und Umfang von Tragwerkselementen wurde dieser Ansatz mit Hilfe der Querschnittswerte aus den höheren Flächenmomenten präzisiert und auf Grundlage der Euler'schen Theorie um den Aspekt der Lagerung ergänzt. Der relativ junge, von Frei Otto geprägte Begriff der *relativen konstruktiven Schlankheit*, erweitert die rein mechanische Bewertung von Stäben mit Hilfe einer Bewertungsmatrix, die die Leistungsfähigkeit mit dem Konstruktionsgewicht korreliert.

Anhand ausgesuchter historischer Beiträge zeitgenössischer Exponenten der Bautechnik aus 4 Jahrhunderten wird die Formulierung und Verwendung des Begriffes der Schlankheit eingehend untersucht. Da die verschiedenen Vorstellungen vom Begriff der Schlankheit nicht Apriori von der Mehrheit der ausgewählten Verfasser als Definition eingeführt wird, sind die Vorstellungen über die Begrifflichkeit erst durch das Studium ihrer empirischen, induktiven Methoden zu erschließen. Ziel der empirischen Versuche war in den meisten Fällen die Formulierung einer Bemessungsformel oder zumindest einer 'Faustformel', für Stützen verschiedener Proportionen aus den üblichen biegefesten Materialien Holz und Eisenwerkstoffen. Die Bemühungen über die Beschreibung der Proportion münden schließlich in den verschiedenen Vorstellungen von Schlankheiten.

Die Auswahl der Beiträge richtet sich dabei nach den Kriterien der zeitlichen Spreizung von der Renaissance bis in die jüngere Vergangenheit und der Quellenlage bzw. deren zeitgenössischen Relevanz. Es kann im Folgenden gezeigt werden, wie die Schlankheit als quantitativer Parameter der Steifigkeit im Verhältnis zu einer Ersatzlänge von Stäben erst durch Euler erkannt wurde, aber die Relevanz seiner theoretischen Erkenntnisse erst zu Beginn des 20. Jahrhunderts für die bautechnische Praxis maßgebend wurde.

5.2 Die triviale Schlankheit

Der Begriff der Schlankheit ist dem allgemeinen Verständnis nach die Relation des Querschnittwertes in Bezug zur Länge eines Stab-Objektes und kann im einfachsten Fall als Verhältniszahl ausgedrückt werden, wobei die Länge immer ein Vielfaches des Durchmessers beträgt; wie zuvor gezeigt werden konnte. Diese einfache geometrische Beschreibung differenziert dabei nicht zwischen massiven, offenen oder hohlen Querschnitten. Implizit wird hier die umhüllende Figur mit ideal gerader Achse aus der Anschauung abgeleitet.

Der triviale Begriff Schlankheit ist aber selbst schon quantitativer Natur, da Stäbe nach den zuvor genannten unteren Grenzproportionen zunächst als gedrungene oder plumpe Stäbe bezeichnet werden. Der Begriff der Schlankheit wird in diesem Kontext komparativ verwendet, ohne absolute Grenzmaße zu nennen und ist daher für eine wissenschaftliche Betrachtung nicht zielführend. Dennoch wurde diese einfache Form der Schlankheit noch in wissenschaftlichen Abhandlungen des 19. Jahrhunderts angewendet, um z.B. empirisch ermittelte Bemessungsformeln zu formulieren.¹¹

¹¹ Siehe: Hodgkinson: Strength of Pillars, 1840

5.3 Von der Vorstellung der Schlankheit bei Leonardo da Vinci

Leonardo da Vinci (1452-1519) wird zutreffend als *Künstleringenieur*¹² bezeichnet, dessen umfangreiches Skizzenmaterial, Berechnungen und Schriften zu ästhetischen und technischen Problemstellungen erst vor wenigen Dezennien umfassend publiziert¹³ und teilweise kommentiert^{14,15} wurde. Seine Manuskripte sind überwiegend Arbeitsstände und Studien, sowohl für realisierte als auch für nicht realisierte Projekte. Sein Einfluss auf die Technikgeschichte ist bis heute umstritten. Nach Auffassung Lückes¹⁶ und Duhems¹⁷ ist sein Einfluss auf die Wissenschafts- und Technikentwicklung nicht direkt nachweisbar, da er zu Lebzeiten nicht publizierte. Folgt man dieser These, so lässt sich sein innovativer Einfluss nur über die von ihm realisierten Projekte nachweisen, wenn diese als solche von seinen Zeitgenossen erkannt und somit kopiert werden konnten. Ein Hauptvertreter dieser Gegenseite ist Ladislao Reti (1901-1973), der sich umfassend mit den einschlägigen Publikationen der Renaissance befasste und maßgeblich an der Edition der Codices Madrid beteiligt war. Seine Argumente fußen auf dem, seiner Meinung nach, nachweisbaren Einfluss Leonardos bei realisierten Projekten unter Leitung Dritter und der Verbreitung Leonardos Ideen durch Zeitzeugen.

*„Alle diese und noch weit mehr historische Zeugnisse weisen auf Leonardos doppelte Berufung und auf die tatsächliche Fertigstellung bedeutender technischer Werke hin. Sie treten damit in Widerspruch zu der Ansicht zahlreicher Gelehrter unserer Zeit, die Leonardos Einfluß auf die Entwicklung der Mechanik und die Durchführbarkeit seiner technischen Projekte in Frage stellen.“*¹⁸

5.3.1 Leonardos Beobachtungen zum Tragverhalten von Stützen

Leonardos Beschäftigung mit Problemen der Statik, insbesondere dem Tragverhalten von Stützen, lässt sich an verschiedenen Stellen nachweisen¹⁹ und nimmt einen weiten Raum über seine gesamte Schaffensperiode ein. Er erkannte das Problem des Tragverhaltens von Stützen nicht nur im Zusammenhang von Architektur- und Ingenieurbauwerken, sondern weitete diese Fragestellung auch auf den Apparatebau bzw.

Zu ¹³:

Das 1964/65 entdeckte Leonardo Manuskript wurde 1974 als Faksimile verlegt und ist aktuell im [www](http://www.codex-madrid.rwth-aachen.de) kommentiert und teilweise transkribiert einsehbar.

¹² Straub: Geschichte der Bauingenieurkunst, 1992, S. 90

¹³ Siehe: o.A.: Nur selten kehre ich zurück, 1974, S. 150-156

¹⁴ Siehe: online: www.leonardodigitale.com

¹⁵ Siehe: online: www.codex-madrid.rwth-aachen.de

¹⁶ Siehe: Lücke: Leonardos Tagebücher, 1940

¹⁷ Siehe: Duhem: Études sur Léonardo de Vinci, 1906

¹⁸ Reti: Elemente der Maschinen, 1974, S. 267 + 269

¹⁹ Archivale Leonardo: Codex Madrid I, S. 189v, 177v, 155r, 136v, 136r, 135v, 135r; Codex Atlanticus, S. 410r

Maschinenbau aus. Das ist insoweit bemerkenswert, als dass die zeitgenössischen Bauwerkskonstruktionen fast ausschließlich für sehr dauerhafte Traglieder in Naturstein, Ziegel oder unbewehrte Derivate des *opus caementitium* ausgeführt wurden, die kaum als biegezugfest galten, und sich somit von den Werkstoffen Metall und Holz des Apparatebaus wesentlich unterschieden. Bei Hochbauten und Ingenieurbauwerken wurden schlanke Druckglieder in Form von Säulen und Pfeiler, monolithisch oder aus geschichteten Säulentrommeln/Steinquader mit Mörtelfugen, realisiert. Das Tragverhalten der steinernen Druckglieder im Grenzzustand unterscheidet sich aber von dem der biegezugfesten Materialien erheblich: klaffende Fugen oder spröder Spontanbruch sind nicht mit einer elastischen Biegelinie zu beschreiben.

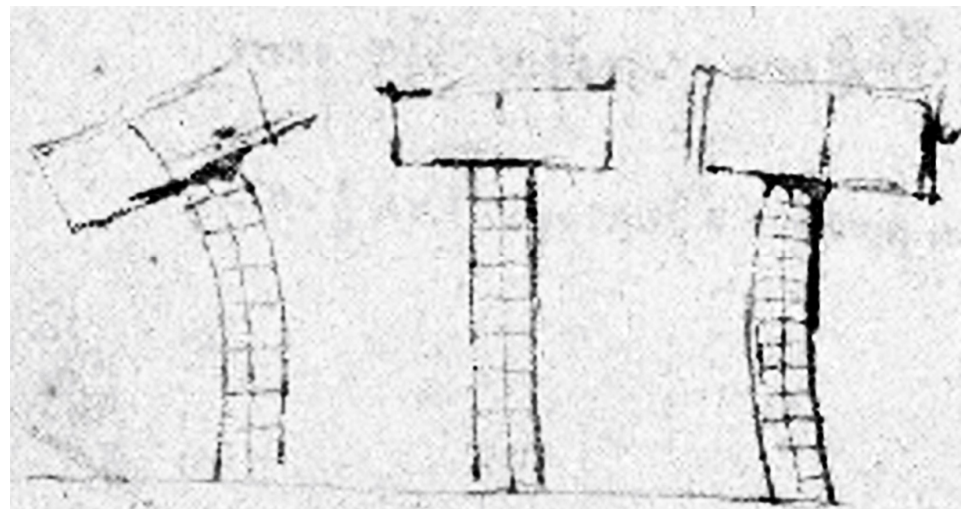


Abb. V. 1: Biegelinien bei exzentrischer Belastung, Leonardo da Vinci

Eine Sonderstellung hatte der Holzbau, dessen natürlich gewachsener Werkstoff eine leistungsfähige Biegezugfestigkeit aufweist. Sind es im Bauwesen die überkommenden Dachstühle und Brücken, so bezeugen historische Darstellungen von komplexen Apparaten wie Hebekränen, Mühlen und dem Schiffsbau, die nur in wenigen Exemplaren erhalten sind, dass man auch dynamische Beanspruchungen zu meistern wusste. Im Vergleich dazu handelte es sich beim massiven Bauen zunächst noch um tektonische Fügungen starrer Körper.

Der hölzerne Stab als Tragwerkselement kann, als Tragstrukturelement mit elastischer Linie aufgefasst (Abb. V. 1) werden, der verschiedenartig beansprucht und gelagert werden kann. Leonardo erkannte auch, dass diese Biegezugfestigkeit mit ihrer elastischen Komponente Arbeit verrichten kann, wie sie zum Abschuss des Bolzens/Pfeiles bei Armbrust und Bogen genutzt wurde. Diese umfassende Kenntnis der Anwendung von Stäben führte auch zur Betrachtung, sowohl von massiven typischen Querschnitten für das Bauwesen

Anm. zu Abb. V.1:

Die elastische Linie wird erst später von Euler eingeführt. Bei Leonardo handelt es sich vermutlich um eine reine geometrische Beobachtung: die Symmetrieachse, bleibt im Gegensatz zu den Randfasern, trotz ihrer Krümmung konstant in ihrer Länge.

als auch den zusammengesetzten Querschnitten²⁰, wie sie eher im Apparatebau vorkamen. Seine Betrachtungen zum Tragverhalten von Stützen stehen in engem Zusammenhang mit Studien zu Hebelarmen und ihren Gleichgewichtsbedingungen, die er anhand abgehängter und gestützter Konstruktionen untersuchte. Diesen Wirkungszusammenhang der gestützten Konstruktionen kann man anhand der Abb. V. 2 nachvollziehen. In seinen Notizen heißt es dazu:

„Se per lo traverso collocherai uno sostentaculo di pari grossezza e materia il quale resista a 100 e che poi tu ne tolga via i nove decimi dell’altezza, tu troverai che l suo rimanente, essendo nelli stremi sostenuto, resisterà a mille.“²¹

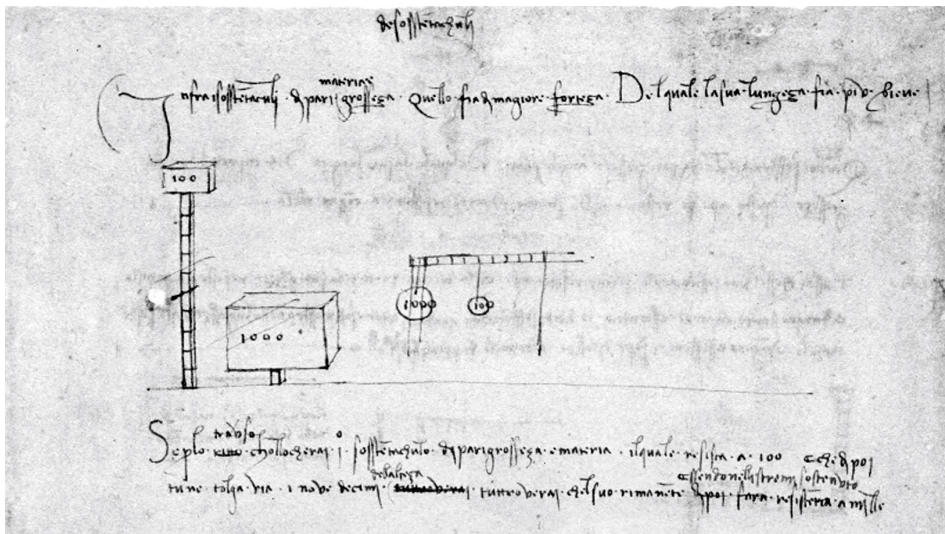


Abb. V. 2: Korrelation der Tragfähigkeit zur Schlankheit zweier Stützen, linke Figuren, Leonardo da Vinci

Seine Studien zu Stützen sind, wie andere Forschungsfelder, über verschiedene Manuskripte verstreut und in Teilaspekten redundant. Er erkannte aber, vermutlich intuitiv, die Randbedingungen für das Tragverhalten von Stützen, die er anhand folgender Aspekte explizit und implizit untersuchte:

- 1.) den Einfluss des mittigen Lastangriffes durch Schwerpunktbetrachtungen und Auswirkungen durch Exzentrizitäten (*explizit mit richtigen Ansätzen*)²²
- 2.) den Einfluss der Querschnittsfläche von massiven und zusammengesetzten Querschnitten (*explizit mit richtigen Ansätzen*)²³

Übersetzung zu ²¹:

„Wenn Sie für den Querbalken eine Stütze von gleicher Größe und gleichem Material platzieren, der 100 widersteht, und dann die neun Zehntel der Höhe wegnehmen, werden Sie feststellen, dass der Rest, der als Stütze dienen soll, tausend widerstehen wird.“

Zu Abb. V. 2:

Die Skizze ist für die bessere Lesbarkeit gespiegelt dargestellt, da Leonardo da Vinci als Linkshänder vorwiegend in Spiegelschrift schrieb.

²⁰ Siehe: Archivale Leonardo: Codex Paris A, S. 46v, 49r

²¹ online: www.leonardodigitale.com Codex Atlanticus, S. 0410 r, Transkript

²² Archivale Leonardo: Codex Arundel, S. 11r; Codex Foster 3, S. 29r, 177v; Codex Paris A, S. 45v; Codex Madrid I, S. 135r, 165v, 177v, 189v

²³ Archivale Leonardo: Codex Paris A, S. 46v

- 3.) den Einfluss der trivialen Schlankheit (*explizit mit richtigen Ansätzen*)²⁴
- 4.) den Einfluss der Querschnittsform (*explizit, aber falsche Schlussfolgerungen*)²⁵
- 5.) den Einfluss der Lagerung (*implizit unvollständig*)
- 6.) den Einfluss der Biegezugfestigkeit (*implizit mit richtigen Ansätzen*)

Diese Untersuchungen sind ihrem Ansatz nach empirisch angelegt, erreichen aber beim Vergleich zweier Modellversuche nicht den Anspruch einer aussagekräftigen Stichprobe, die induktive Erkenntnisse zur Theoriebildung erlaubt, um sie in eine konsistente Bemessungsformel zu überführen. Allein für die triviale Schlankheit finden sich Zahlenverhältnisse, die rudimentäre Anhaltspunkte zur Tragfähigkeit unterschiedlich schlanker Stützen gleichen Durchmessers bieten, und implizit somit eine Hyperbelform der Tragfähigkeitsabnahme bei steigender Schlankheit entsprechen würden.

Anhand der der beiden kommentierten Skizzen in den Abb. V. 2 und Abb. V. 3 lässt sich der Einfluss der trivialen Schlankheit im Verständnis von Leonardo nachvollziehen.

Die Skizze aus dem Codex Atlanticus in Abb. V. 2 zeigt zwei schematische Stützen im Vergleich ihrer Tragfähigkeit. Es ist anzunehmen, dass beide Stützen den gleichen Querschnitt besitzen sollen und aus einem Stück jeweils identischem, biegezugfestem Material gefertigt sind - mit $EI = \text{const.}$; die horizontalen Striche stellen Teilungsstriche zur Ablesbarkeit der Länge dar – eine Deutung als segmentierter Pfeiler mit Horizontalfugen des Steinschnitts, ist bei der gewählten Schlankheit unwahrscheinlich. Die linke Stütze hat danach die 10-fache Höhe gegenüber der rechten Stütze und trägt ein 10-fach kleineres Gewicht gegenüber der zweiten Stütze. Beide Gewichte sind mit ihrem Schwerpunkt über der Längsachse der Stützen angeordnet. Eine explizite Aussage zur Lagerung der Stützen am unteren Ende, flach aufstehend oder eingespannt, ist in der Skizze nicht angelegt; nach Kurrer²⁶ handelt es sich um eine Einspannung. Die Qualität der Überlegungen geht aber schon ins Abstrakte, wenn Leonardo in seiner Darstellung ideelle Systeme skizziert: gerade Stabachse, quadratischer Querschnitt und zentrische Lasteinleitung, symbolisiert durch generische Massen ohne konkreten baupraktischen Bezug oder Maßstab. Soll ein Teilungsstrich für eine Längeneinheit (1 LE) und der quadratische Querschnitt mit einer Seitenlänge von $\frac{1}{2}$ LE stehen, dann hat die hohe Stütze ein λ von 69,3 oder eine triviale Schlankheit von 1:20.

Zu λ :

Siehe hierzu Gl. V.54. Die noch heute übliche Bewertung der Schlankheit wurde erst auf den Arbeiten Leonard Eulers (1707-1783) aufbauend, ab Mitte des 18. Jhd., entwickelt.

²⁴ Archivale Leonardo: Codex Paris A, S. 49r, Atlanticus, S. 410r

²⁵ Archivale Leonardo: Codex Atlanticus, 890r

²⁶ Siehe: Kurrer: Geschichte der Baustatik 2003, S. 164

Die von Leonardo für dieses Beispiel getroffene quantitative Aussage ist ein einfaches antiproportionales Verhältnis von Länge zu Bruchlast in Form einer Hyperbel, hier mit dem Antiproportionalitätsfaktor 1000:

$$\begin{aligned} \text{Gl. V. 6} \quad & \frac{10LE}{1LE} \cdot 100lbs = \frac{1LE}{xLE} \cdot 1000lbs \\ & \Rightarrow a[lbs] \propto \frac{1000}{x[LE]} \end{aligned}$$

Es ist nicht erwiesen, ob dieses Verhältnis empirisch mit weiteren Versuchen ermittelt wurde – in jedem Fall weicht die Tragfähigkeitszunahme mit dem Faktor 10 um ein zehnfaches von der Modellrechnung nach Euler ab, wenn man den Eulerfall 1 in Betracht zieht:

Vergleichende dimensionslose Berechnung für den Eulerfall I:

$$\begin{aligned} \text{Gl. V. 7} \quad & \text{hier: } E \cdot I = \text{const.} \\ & l = 10LE \end{aligned}$$

$$\text{Gl. V. 8} \quad s_{k1} = 2 \cdot l$$

$$\text{Gl. V. 9} \quad s_{k2} = 2 \cdot \frac{1}{10} l$$

$$\text{Gl. V. 10} \quad \text{hohe Stütze links} \Rightarrow \frac{\pi^2}{(2l)^2} = \frac{\pi^2}{4}$$

$$\text{Gl. V. 11} \quad \text{niedrige Stütze rechts} \Rightarrow \frac{\pi^2}{(2 \cdot \frac{1}{10} l)^2} = \frac{\pi^2}{0,04}$$

Hier ist die Tragfähigkeitszunahme mit dem Faktor 100 zehnfach so groß. Leonardo führt somit ein lineares Verhältnis für die Länge ein, die bei Euler später als quadratischer Term Eingang findet.

Zu Gl. V.6:

Das konstante Produkt der zwei Größen x (Höhe in LE) und y (Traglast in lbs) ist bekannt aus zwei Wertepaaren:

1000 lbs bei 1 LE

100 lbs bei 10 LE

und beträgt 1000 [ohne Einheit] und kann in der allgemeinen Form als antiproportionales Verhältnis ausgedrückt werden:

$$y = \frac{x_0 \cdot y_0}{x} = \frac{1000}{x}$$

Die in der Gl. V.6 angeführten Einheiten sind gleich skaliert, sodass von einer Längeneinheit $[LE]$ hier auf eine Traglast $[lbs]$ geschlossen werden kann.

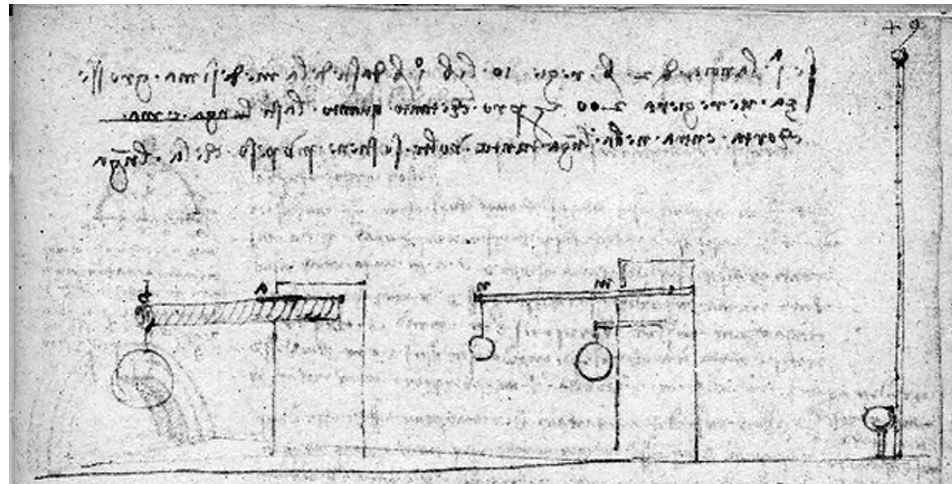


Abb. V. 3: Zweites Beispiel Leonardos zur Korrelation der Tragfähigkeit zur Schlankheit zweier Stützen

Die Skizze in Abb. V. 3 zeigt einen ähnlichen schematischen Versuchsaufbau. Im Gegensatz zur erst genannten Skizze (Abb. V. 2) sind hier die Gewichte kugelförmig und ohne Maßzahl, die Stütze ohne räumliche Darstellung mit 15 Teilungsstrichen bzw. einem Teilungsstrich. Der kommentierende Text weicht aber in seinen konkreten Maßzahlen von zwei Ellen/10 Pfund bzw. einer Elle/20 Pfund von den skizzierten Proportionen ab:

Übersetzung zu 27:

„Wenn eine 2-Arm-Lanze 10 Pfund hält, hält ein Arm des Schafts [hier: 1-Arm-Lanze] der gleichen Größe [hier: Durchmesser] 20 Pfund, wobei zu berücksichtigen ist, dass [so oft] der kurze Schaft in den langen hineinragt [hier: der Länge des langen Schafts entspricht] und oft mehr [hier: so viele Male mehr] Gewicht hält als der lange.“

„Se una lancia di 2 braccia regge 10 libbre, uno braccio d'aste de la medesima grossezza ne reggerà 20, i[m]però che tanto quanto l'aste corta entra nella lunga, tante volte sostiene più peso che la lunga.“²⁷

Daraus ergibt sich eine Hyperbel mit der folgenden Gleichung und einem Tragfähigkeitsfaktor von 2:

$$\text{Gl. V. 12} \quad \frac{2LE}{1LE} \cdot 10lbs = \frac{1LE}{xLE} \cdot 20lbs$$

$$\Rightarrow a[lbs] \propto \frac{20}{x[LE]}$$

Zu Gl. V.12:

Siehe hierzu analog die Anm. zu Gl. V.6.

Zu Gl. V.13-17:

Leonardos Längenangaben 2 LE und 1 LE aus Gl. V.12 werden in die Eulerknickformel übernommen; wobei gelten soll:

$$2LE = 1l$$

Die Eulerformel vereinfacht sich, wenn man den unbekannten, aber konstanten Faktor EI weglässt. Es ergeben sich zwei Brüche zum Vergleich mit π^2 im Zähler.

Vergleichende dimensionslose Berechnung für den Eulerfall I:

$$\text{Gl. V. 13} \quad \text{hier: } E \cdot I = \text{const.} \\ l = 2LE$$

$$\text{Gl. V. 14} \quad s_{k1} = 2 \cdot l$$

²⁷ online: www.leonardodigitale.com □ Codex Paris A, S. 49r, Transkript

Gl. V. 15

$$s_{k2} = 2 \cdot \frac{1}{2} l$$

Gl. V. 16

$$\text{Stütze 2 LE mit } s_{k1} \Rightarrow \frac{\pi^2}{(2l)^2} = \frac{\pi^2}{4}$$

Gl. V. 17

$$\text{Stütze 1 LE mit } s_{k2} \Rightarrow \frac{\pi^2}{(2 \cdot \frac{1}{2} l)^2} = \frac{\pi^2}{1}$$

Hier ist der Faktor der Tragfähigkeitszunahme 4.

Beide Versuche stellen eindeutig ein antiproportionales Verhältnis von Länge zur Tragfähigkeit bei gleichem Material, Querschnitt und Lagerung heraus. Der grafische Verlauf als Hyperbelkurve wird aber nicht durch weitere Varianten der Länge vs. Tragkraft von Leonardo überprüft oder als solcher grafisch dargestellt. Beide Versuche sind nur über das angewendete Prinzip miteinander vergleichbar und scheinen sich im Modellmaßstab zu bewegen. Es werden keine weiterführenden Erkenntnisse notiert, die auf Grundlage der Festlegung der Materialität oder der Skalierbarkeit praktischen Nutzen zur Bemessung einer Stütze im realen Maßstab bieten würde.

Trotz ihrer Ansätze zur Abstraktion, sind die Skizzen nicht Ausgangs- oder Endpunkt einer vertiefenden Betrachtung. Leonardos Überlegungen sind nicht ausreichend dokumentiert, um zu bewerten, inwieweit er überhaupt das Ziel einer Bemessungsformel anstrebte.

Carlo Zammattio, als Co-Autor Retis, relativiert unsere Erwartungshaltung gegenüber dem Renaissance-Menschen Leonardo, wenn er erklärt:

„Man kann jedoch keine derartig komplizierten begrifflichen Analysen in einer Zeit erwarten, in der selbst die Grundbegriffe noch ganz nebelhaft waren. Auch dürfen wir nicht vergessen, daß der jahrhundertealte Universalienstreit, obwohl zu Leonardos Zeiten fast beendet, doch nicht vermocht hatte, den Weg zur Verallgemeinerung von Grundbegriffen zu weisen, und sich mit Vergleichen und Messen von »größerer« und »kleinerer« Universalität begnügte. Die Wandlung zur Universalität vollzog sich durch die philosophisch-kritische Methode unter dem Einfluß des Kantischen Geistes erst viele Jahrhunderte später. Daß muß betont werden, damit wir sehen, wie Leonardo versucht hat, zu »allgemeinen« Aussagen vorzustoßen, wann immer er es vermochte. In den meisten Fällen taugt die von ihm gefundene Gültigkeit nicht zur Verallgemeinerung, sondern nur zur

Anm.:

Über das Thema Stützen plante Leonardo ein eigenes Werk. vgl.:

online: [www.codex-mad-rid.rwth-aachen.de](http://www.codex-mad-rid.rwth-aachen.de/Stützen) □ Stützen

*Ausdehnung der Beobachtungen und Untersuchungen, die er für einen konkreten Fall anstellte, auf eine ganze Gruppe von Erscheinungen.*²⁸

Seine Unschärfe in den Begrifflichkeiten erschwert die Auswertung Leonardos Notizen erheblich, betreffen sie doch Grundlagen zur exakten Beschreibung seiner Gedankengänge. Die konsistente Bezeichnung von Dimensionen, wie Höhe, Länge, Tiefe, Umfang, Volumen und deren Zusammenhänge werden nicht definitorisch eingeführt. Der Körper (*corpo*) der Stütze ist untrennbar Volumen/Masse = Tragfähigkeit. Entsprechend schwierig ist die Wiedergabe von Leonardos Überlegungen zur weiterführenden Untersuchung der Skalierung von Stützen, wenn er versucht die 'zuträglichen' und 'abträglich' Faktoren zu identifizieren und quantitativ zu erfassen, wie in Abb. V. 4 überliefert. Der Freiheitsgrad nur einer der Dimensionen, Länge oder Durchmesser bei Verdoppelung des Volumens, hat nach Leonardo unterschiedlichen Einfluss auf die Zunahme der Tragfähigkeit. Im Codex Paris A (Abb. V. 4) kann man so lesen, dass er den Einfluss der Querschnittsfläche von massiven und zusammengesetzten Querschnitten aus der Betrachtung der Skalierung abzuleiten versuchte. Die Verdoppelung des *corpo* steht hier für eine Verdoppelung des Volumens einer gegebenen Rundstütze, wobei er einen gemeinsamen Faktor für den Durchmesser und die Länge sucht. Wie man heute weiß, ergeben sich für Zylinder folgende Zusammenhänge:

$$\text{Gl. V. 18} \qquad A_{\text{Kreis}} = \pi \cdot r^2$$

$$\text{Gl. V. 19} \qquad U_{\text{Kreis}} = \pi \cdot 2r$$

$$\text{Gl. V. 20} \qquad I_{\text{Kreis}} = \frac{\pi}{4} \cdot r^4$$

$$\text{Gl. V. 21} \qquad V_{\text{Zylinder}} = A_{\text{Kreis}} \cdot h$$

Ein gemeinsamer Faktor, der Radius/Durchmesser und Höhe skaliert ist unmöglich, da der Radius zum Quadrat berücksichtigt wird. Die Verdoppelung des Volumens ist eine Problemstellung, die Leonardo auch an einfacherer Stelle nicht exakt zu lösen wusste.

²⁸ Zammattio: Naturwissenschaftliche Studie, 1974, S. 214

So verdeutlicht das gefundene Beispiel von Augusto Marinoni, anhand der antiken Problemstellung der Verdoppelung des Würfels, genauer gesagt seines Volumens, Leonardos mathematische Grenzen, wenn er nicht die dritte Wurzel ziehen konnte und das Ergebnis nur nähert. Die Lösung zur Verdoppelung des Volumens eines Würfels mit 4 Ellen Kantenlänge lautet daher nach Leonardo:

„5 und ein bestimmter, nicht ausdrückbarer Bruch, der leicht zu machen, aber schwer zu sagen ist“²⁹

Bei der Kreisberechnung kommt der zu Zeiten Leonardos noch nicht erfasste irrationale, transzendente Charakter der Kreiszahl π hinzu, die man nur nach Archimedes Näherung von $22/7$ kannte, die sich aber in der konstruktiven Anwendung als ausreichend genau bewährte.

Anm.:

Die Zahl wird heute ausreichend genau mit $\pi = 3,141593$ gerundet für die meisten Anwendungen angewendet;

$$\pi_{hist.} = \frac{22}{7} = 3,1428571$$

Bis heute wurden über 22,4 Billionen Nachkommastellen mit Hochleistungsrechnern ermittelt.

²⁹ Marinoni: Leonardos Schriften, 1974, S. 73

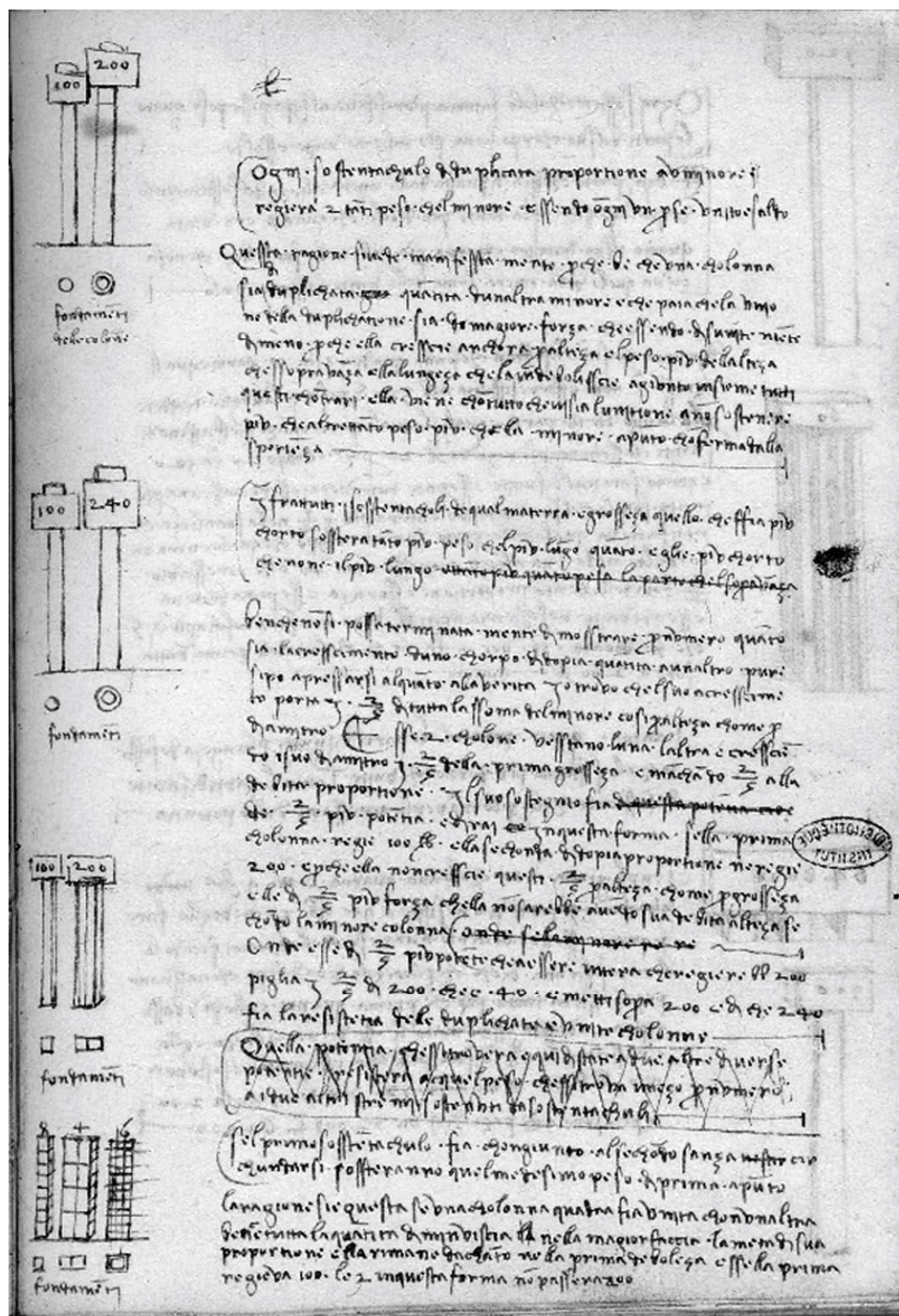


Abb. V. 4: Positive Korrelation der Tragfähigkeit zur Schlankheit verschiedener Stützen, Leonardo da Vinci

Leonardos Aussage umfasst im ersten Aspekt der Abb. V. 4: Verdoppelt man das Volumen einer Stütze, bei gleichem Skalierungsfaktor für Höhe und Durchmesser, so trägt sie auch das Doppelte. Schon die Kenntnis des Spannungsbegriffes hätte geholfen, seine Aussage kritisch zu beurteilen, da er seinen Faktor mit $\frac{2}{5}$ (eigentlich ist $1\frac{2}{5}$ hier gemeint) deutlich unter dem Faktor 2 sah, der eine identische Spannung geliefert hätte.

Im zweiten Aspekt der Abb. V. 4 möchte Leonardo darlegen, inwieweit die Verdoppelung des Volumens einer Rundstütze bei Beibehaltung der Höhe der Ausgangsstütze sogar zu einer Traglastzunahme um den Faktor $2\frac{2}{5}$ führt. Anders verhält es sich dagegen, wenn die Stütze einen quadratischen Querschnitt hat und die Verdoppelung des Volumens bei Beibehaltung der Höhe über eine Addition eines zweiten Quadrates erfolgt. Die Stütze hat jetzt eine schwache und eine starke Seite (!); ihre Tragfähigkeit ist daher nur um den Faktor 2 erhöht. In der dritten Figur der Abb. V. 4 wird die quadratische Stütze durch die additiven Flächenanteile einer zweiten Stütze gleichmäßig nach allen Seiten verstärkt und folgt somit dem Prinzip der Beispiele der Rundsäulen – hier ohne Kommentar mit Wiederholung des zuvor geäußerten Faktors $2\frac{2}{5}$.

Im Codex Atlanticus Seite 890r, Abb. V. 5, geht Leonardo auf Stützen mit veränderlichem Querschnitt über die Höhe ein, wie sie stilistisch als Vorbilder seit der Antike zur Anwendung kamen. Seine Skizze hat die Qualität einer flüchtigen Randnotiz und stellt vier gleichhohe Rundstützen(?) nebeneinander. Davon ist die dritte von links mit deutlicher Taille zu unterscheiden.

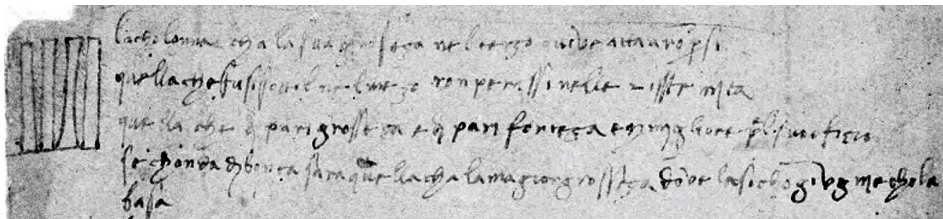


Abb. V. 5: Korrelation der Tragfähigkeit zur Querschnittsänderung über die Höhe verschiedener Stützen, Leonardo da Vinci

Er beobachtete, dass eine Stütze mit einer Schwellung im mittleren Drittel schneller versagen würde:

*„La colonna ch'ha la sua grossezza nel terzo, quiv'è ata a rompersi.“*³⁰

Es scheint sich hierbei um ein Spannungsproblem in den Anschlusspunkten zu handeln, das gegenüber dem Stabilitätsversagen in den Vordergrund tritt, da der maximale Trägheitsradius wirksam auf der halben Höhe liegt.

Seine weiterführenden Bewertungen sind aber nicht mehr anhand seiner fragmentarischen Notizen und Skizzen klar zu erfassen, wenn er die konische Stütze als zweitbeste Form einer tragfähigen Stütze bezeichnet.

Übersetzung zu ³⁰:

„Die Säule, die ihre besondere Dicke im dritten Stück hat, kann leichter brechen.“

³⁰ online: www.leonardodigitale.com □ Codex Atlanticus, S. 890r; Transskript

Übersetzung zu ³¹:

„Diejenigen, die sich unter der Mitte befanden, sollten an den zwei Enden brechen. Das, was von gleicher Dicke und gleicher Festigkeit ist, stellt sich weniger in den Weg. Zweiter in der Güte wird derjenige sein, der die größte Dicke hat, dort, wo der Anschluss an die Basis erfolgt.“

*„Quelle che fussi sotto `l mezzo, romperassi nelle 2 ist[r]emità. Quella ch'è di pari grossezza e di pari fortezza, è migliore pel suo offizio. Seconda di bontà sarà quella ch'ha la maggior grossezza, dove la si congiugne co' la basa.“*³¹

5.3.2 Einordnung der Erkenntnisse Leonardos

Leonardos Codices bieten einen intimen Einblick in die Gedankenwelt eines epochalen Genies der Renaissance. Diese Epoche der Wiederentdeckung der antiken ästhetischen Ideale steht auch für den Ausgangspunkt der wissenschaftlichen Fragenstellungen und des wissenschaftlichen Denkens. Auch wenn Leonardos mathematisches Rüstzeug nicht dem des Akademikers entsprach, so erkannte er wesentliche Fragestellungen und konnte sich durch seine Beobachtungsgabe Lösungen empirisch annähern. Obwohl seine Studien zu Stützen zunächst keinen hervorzuhebenden Einfluss auf die Baupraxis hatten, sind seine Notizen kulturgeschichtlich von Interesse, da man anhand ihrer den theoretischen, zeitgenössischen Diskurs studieren kann.

Leonardo prägt noch keinen selbstständigen Begriff der Schlankheit. In den dargelegten Beobachtungen/Experimenten in den Abb. V. 2 und Abb. V. 3 wird zunächst eine triviale Schlankheit aus den Proportionen der Stäbe ersichtlich, die sich nur aus der Skizze interpretieren lässt. Die im begleitenden Text genannten Längen werden nicht mit Maßangaben über die Querschnitte in ein quantifizierbares Verhältnis zur Stablänge gesetzt. Die triviale Schlankheit wird dadurch vergleichbar, dass der Quermesser in den Abb. V. 2 und Abb. V. 3 konstant bleibt und nur die Länge variiert wird. Mit der Abb. V. 4 setzt eine Differenzierung ein: Leonardo vergrößert den kreisrunden Querschnitt konzentrisch bei konstanter Länge und stellt den Unterschied zur Vergrößerung des quadratischen Querschnitts in eine Hauptrichtung bei konstanter Länge heraus – er erkennt die schwache Achse. Mathematisch gelingt es ihm aber nicht, die unterschiedliche Wirksamkeit der zugefügten Flächenanteile auf den Querschnitt bezogen zu erfassen und in einen Term mit der Länge und Lagerung zu einem Maß der Schlankheit zusammenzuführen. Im dritten Aspekt ist die Veränderlichkeit der Querschnittsfläche über die Länge der Stütze ein erfasster Effekt auf die Tragfähigkeit. Die Notizen Leonardos sind in diesem Punkt aber fragmentarisch und bieten keinen Hinweis auf eine quantitative Erfassung dieses Problems.

Anm.:

Im Codex Paris A wird ein einfacher Stab mit seiner Höhe und seinem Durchmesser explizit genannt, um ihn mit zusammengesetzten Querschnitten mit einer festen Umwicklung und vielfacher Länge vergleichen zu können.

Siehe: online: [www.leonardodigitale.com//Paris A_0048v](http://www.leonardodigitale.com//Paris_A_0048v), Transkript

³¹ online: www.leonardodigitale.com □ Codex Atlanticus Transkription S. 890r, Transkript

5.4 Von der Vorstellung der Schlankheit bei

Pieter van Musschenbroek

Pieter van Musschenbroek (1692-1761) hatte sich zu Beginn des 18. Jahrhunderts verschiedenen Experimenten zum Thema Materialfestigkeiten und Stabilitätsproblemen gewidmet. Seine Erkenntnisse über die Zugfestigkeit der zeitgenössischen Eisenwerkstoffe bildet dann auch die Berechnungsgrundlage für den

„[...] ersten Versuch einer ingenieurmäßig-wissenschaftlichen Bemessung eines Bauglieds [...]“³²

– und wurde als Durchbruch der exakten Wissenschaften in der Diskussion von 1743, um die notwendige Ertüchtigung der Kuppel des Petersdoms, unter Papst Benedict XIV, aufgefasst.³³

Konnte die Zugfestigkeit aus beliebigen Spezimen abgeleitet werden - galt es doch nur, die Bruchkraft auf die Querschnittsfläche zu beziehen - kannte Musschenbroek die Problematik bei Druckversuchen, wo die Geometrie wesentlichen Einfluss auf die notwendige Bruchkraft ausübt.

Straub erklärt dazu fälschlicherweise³², dass Musschenbroek 1729 aus einem empirischen Ansatz das Knicken von Stäben mit der Formel:

Gl. V. 22

$$F_{kr} = \frac{cd^3}{l^2}$$

beschrieb.

5.4.1 Musschenbroeks empirischer Ansatz

Musschenbroek publizierte seinen experimentellen Ansatz detailliert. Der Originaltext von *Introductio ad Cohaerentiam Corporum Firmorum*³⁴ wurde in lateinischer Sprache verfasst und durch technische Illustrationen begleitet. Er gibt Auskunft über Art und Umfang der Experimente und Musschenbroeks deduktiven theoretischen Überlegungen, die sich dem 15 Jahre späteren, theoretischen Modells Eulers näherten.

Anm.:

Die Verringerung der Querschnittsfläche durch die Einschnürung bei duktilen Werkstoffen bei Zugversuchen wurde erst später Gegenstand genauerer Beobachtungen.

Zu Gl. V. 22:

F_{kr} : Bruchkraft

l : Länge,

c : Materialkonstante

[später $\pi^2 \times E$],

d : Querabmessung

[Breite] des Stabes

³² Straub: Geschichte der Bauingenieurkunst, 1992, S. 152

³³ o.A.: Cupola di S. Pietro, 1742

³⁴ Musschenbroek: COHAERENTIA CORPORUM FIRMORUM, 1729, S. 652-668

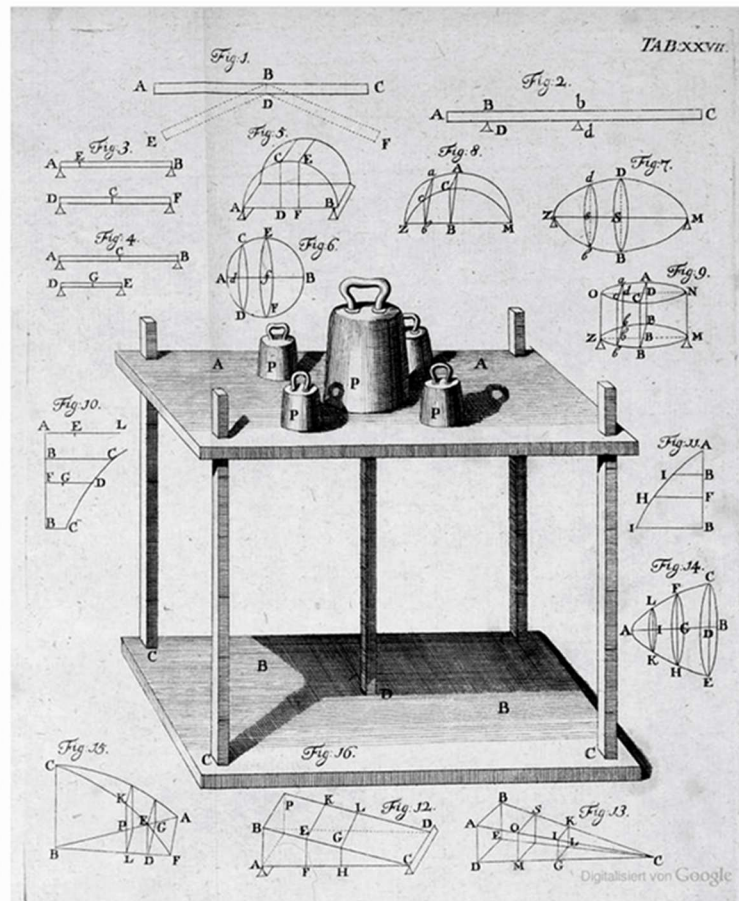


Abb. V. 6: Versuchsaufbau für Knickversuche, Musschenbroek 1729

Anm.:

Vereinfacht wird hier der aktuelle Zoll mit 25,4 mm angesetzt, da die historischen Zölle regional unterschiedlich ausfielen.

Zu ³⁵:

Eiche in experimentum CCXXII - CCXXV, Esche in experimentum CCXXVI - CCXXXII, Linde in experimentum CCXXXIII - CCXXXVIII, Kiefer in experimentum CCXXXIX - CCXLI und Ulme in experimentum CCXLII

Die Prüfmaschine war so konstruiert, dass sie einen gleichmäßigen, vertikal wirkenden Druck auf den Stab als Tragwerkselement ausüben konnte. Die Abb. V. 6 zeigt deutlich die vier Führungsstäbe, die ein Verdrehen und die Verschiebung in der Horizontalen der oberen, beweglichen Platte behinderte. Bei den Probekörpern handelte es sich ausnahmslos um kleinformatige Holzstäbchen verschiedener Holzarten. Der hölzerne Stab³⁵ war maximal 18 Zoll lang und hatte zumeist einen quadratischen Querschnitt, was bei einer minimalen Kantenlänge von 5,8 mm eine maximale triviale Schlankheit von ca. 1:79 ergibt und somit einem λ von ca. 273 entspricht; der gedrungenste Stab war 6 Zoll lang, bei einem rechteckigen Querschnitt von 0,25 auf 0,24 Zoll, was die triviale Schlankheit 1:25 ergibt. Die Lagerung des Stabes war im Gegensatz zu Eulers theoretischem Modell noch nicht idealisiert; der Stab stand stumpf mit seinen Stirnseiten, Faserrichtung normal, auf den Platteninnenseiten. Musschenbroek näherte sich empirisch trotzdem dem Eulerfall II, wenn Straub im Text über Musschenbroek konstatiert: „[...], daß der Widerstand schlanker, auf Knicken beanspruchter Stäbe im umgekehrten Verhältnis zum Quadrat ihrer Länge abnimmt.“

³⁵ Musschenbroek: COHÆRENTIA CORPORUM FIRMORUM, 1729, S. 655 ff

und in der Fußnote korrigierend kommentiert:

„Musschenbroek setzt dabei

Gl. V. 23

$$F_{kr} = \frac{cd^3}{l^2}$$

, während für die „Knicklast“ schlanker Stäbe der Länge l und dem Querausschnitt d im linearen EULER-Bereich, wie wir wissen, tatsächlich

Gl. V. 24

$$F_{kr} = \frac{cd^4}{l^2}$$

gilt“³⁶.

Aus seinen Experimenten N° 222: 18“ Eichenholzstäbchen mit quadratischem Querschnitt von 0,23“ mit einer Bruchlast von 23 Pfund und N° 223: 9“ Eichenholzstäbchen mit identischem Querschnitt und einer Bruchlast von 92 Pfund, schloss er in PROPOSITIO CXVIII auf folgendes Verhältnis in Gl. V. 25 bis Gl. V. 28:

Gl. V. 25

$$18^2 = 324$$

$$\rightarrow F_{Bruch} = 23 \text{ Pfund}$$

Gl. V. 26

$$9^2 = 81$$

$$\rightarrow F_{Bruch} = 92 \text{ Pfund}$$

Gl. V. 27

$$23 : \frac{1}{324} = 92 : \frac{1}{81}$$

Gl. V. 28

$$\Rightarrow \frac{23}{92} = \frac{1}{324} : \frac{1}{81} = \frac{81}{324} = 0,25$$

$$23 : 92 = 81 : 324$$

Es kann ein charakteristischer Quotient $c = \text{const.}$ ermittelt werden:

Gl. V. 29

$$c_{\text{charakt.}} = F_{Bruch} : \frac{1}{l^2}$$

Anm.:

Die folgenden Gleichungen sind aus dem originalen Fließtext entwickelt und in der heute üblichen Notation dargestellt. Auf die exakte Umrechnung des historischen Zolls und Pfunds wird hier verzichtet; genauso auf die Differenzierung von Masse [Pfund] und Kraft, die hier aus dem historischen Verständnis heraus gleichgesetzt werden.

³⁶ Straub: Geschichte der Bauingenieurkunst, 1992, S. 152

Der Quotient für das Material Eiche mit einem quadratischen Querschnitt von 0,23“ x 0,23“:

$$\text{Gl. V. 30} \quad c_{\text{charakt.}} = 23 : \frac{1}{18^2} = 7452$$

Die Formel zur Berechnung einer Bruchkraft bei variabler Länge dieses Querschnitts lautet daher nach Musschenbroek:

$$\text{Gl. V. 31} \quad F_{\text{Bruch}} = \frac{c_{\text{charakt.}}}{l^2}$$

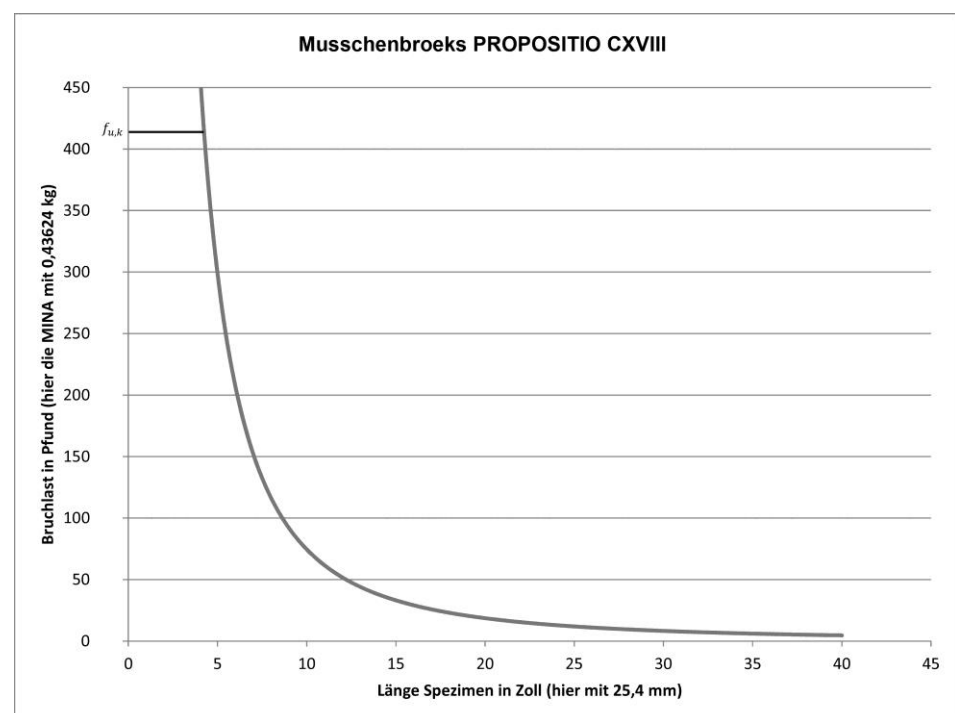


Abb. V. 7: Theoretische Hyperbelkurve zu Musschenbroeks PROPOSITIO CXVIII

Errechnet man für verschiedene Längen die Bruchkraft nach Musschenbroek, ist der prinzipielle Verlauf des Graphen der späteren Euler-Hyperbel ähnlich, wie in Abb. V. 7 dargestellt. Musschenbroek versäumt es aber, seinen Ansatz auf Konsistenz zu überprüfen. Der Quotient c wird auf Grundlage zweier Wertepaare gewonnen und nicht durch weitere Versuche verifiziert. Weitere Quotienten wurden mit der gleichen Methode für die übrigen Experimente mit anderen Holzarten und Querschnitten bestimmt.

In einem nächsten Schritt, PROPORTIO CXIX³⁷, wurde die Länge und die Querschnittsfläche gleicher Holzarten variiert. Ausgangspunkt bildete hier das Experiment N° 222, dessen Quotient $c_{222} = 7452$ er zur Berechnung der theoretischen Bruchlast eines zwölfzölligen Stabes mit 0,23“ quadratischer Kantenlänge heranzog:

$$\text{Gl. V. 32} \qquad F_{Bruch} = \frac{7452}{12^2}$$

$$F_{Bruch} = 51,75 \text{ Pfund}$$

Im Experiment N° 225 wurde die Bruchlast eines zwölfzölligen Stabes mit quadratischer Kantenlänge von 0,35“ experimentell mit 185 Pfund ermittelt. Im Folgenden versuchte Musschenbroek auf Grundlage seiner ersten Formel, durch eine Erweiterung um den Einfluss des Quermessers, eine umfassende Bemessungsformel herzuleiten. Der Unterschied in der Bruchlast beider zwölfzölliger Stäbe wurde von ihm zu Recht allein in ihren unterschiedlichen Querschnitten gesehen. Die Kantenlängen aus N° 222 und N° 225 werden als natürliche Zahlen vereinfacht geschrieben Gl. V. 33 bis Gl. V. 34:

$$\text{Gl. V. 33} \qquad 0,23'' \rightarrow 23$$

$$\text{Gl. V. 34} \qquad 0,35'' \rightarrow 35$$

Es wird zunächst der einfache Einfluss des vergrößerten Quermessers errechnet:

$$\text{Gl. V. 35} \qquad d_1 23 : d_2 35 = F_1 51,75 : F_2 x$$

$$\text{Gl. V. 36} \qquad \Rightarrow F_2 x = \frac{35}{23} \cdot 51,75 = 78,75 \text{ Pfund}$$

Anm.:
Das Verhältnis in Gl. V. 35 lautet im Original:
 $23,35 :: 51\frac{3}{4}, 78\frac{2}{3}$
und wird als Rundungsfehler korrigiert wiedergegeben, ebd. S. 661

In einer zweiten Relation werden nun die Quadrate der Kantenlänge ins Verhältnis zu der errechneten einfach erhöhten Bruchlast gesetzt und die theoretische Bruchlast des Stabes aus Experiment N° 225 errechnet:

³⁷ Musschenbroek: COHÆRENTIA CORPORUM FIRMORUM, 1729, S. 660ff

Gl. V. 37

$$0,23'' \rightarrow 23^2 = d_1^2 529$$

Gl. V. 38

$$0,35'' \rightarrow 35^2 = d_2^2 1225$$

Anm.:

Das Verhältnis in der Gl. V. 39 lautet im Original:

$529, 1225 :: 78\frac{2}{3}, 182$ und wir als Rundungsfehler korrigiert wiedergegeben, ebd. S. 661

Gl. V. 39

$$d_1^2 529 : d_2^2 1225 = F_2 78,75 : F_{Bruch\ 225} x$$

$$\Rightarrow F_{Bruch\ 225} x = \frac{d_2^2 1225}{d_1^2 529} \cdot F_2 78,75 = 182,36 \text{ Pfund}$$

Der experimentell ermittelte Wert lag bei 185 Pfund und somit nach Musschenbroeks Urteil ausreichend nahe, um von einer mathematischen Berechenbarkeit zu sprechen, wenn er sagte:

„[...] *ipsum vero Experimentum dedit libras 185. quod pondus cum calculo accurate satis congruit.*“³⁸

Übersetzung zu ³⁸:

„In der Tat ergab dieses Experiment [ein Ergebnis von] 185 Pfund, wobei dieses Gewicht genau und zufriedenstellend der Berechnung entsprach“

Fasst man die Zwischenschritte zusammen, so ergibt sich eine Formel (Gl. V. 40), die von einem charakteristischen Quotienten c mit seiner zugehörigen Kantenlänge d_0 , für quadratische Querschnitte, bei gleicher Holzart die Berechnung der Bruchkraft verschiedener langer und breiter Stäbe mit quadratischem Querschnitt ermöglicht:

Gl. V. 40

$$F_{Bruch} = \frac{c_{charakt.}}{l^2} \cdot \frac{d_1^3}{d_0^3}$$

Ergänzend zu den quadratischen untersuchte Musschenbroek auch rechtwinklige Querschnitte mit variierenden Seitenverhältnissen. Er beobachtete, dass das Ausknicken aber immer in Richtung der vorgekrümmten Seite erfolgte; er sprach von *latera non inflectur* und *latera inflectur* – „[...] *latera quæ inflectuntur semper sunt tenuissima* [...]“³⁹

Übersetzung zu ³⁹:

„[...] die Seiten, die gebogen sind, sind immer schwach [...]“

Eine generalisierte Berechnungsformel der Bruchkraft wurde anhand der Experimente N° 233 und N° 243 erstellt. Nach seiner Annahme ist aber der Knickwiderstand auch von der längeren Seite abhängig (Abb. V. 8). Er reduziert daher zunächst die gemessene Bruchkraft des Stabes aus Experiment N° 233 um das einfache Verhältnis seiner langen Kante zur Kantenlänge des Stabes aus Experiment N° 243:

³⁸ Musschenbroek: COHÆRENTIA CORPORUM FIRMORUM, 1729, S. 652-668

³⁹ Musschenbroek: COHÆRENTIA CORPORUM FIRMORUM, 1729, S. 661

N° 233: zwölfzölliger Lindenstab mit 0,25“ x 0,35“,
Bruch bei 45 Pfund

N° 243: zwölfzölliger Lindenstab mit 0,34“ x 0,34“,
Bruch bei 81 Pfund

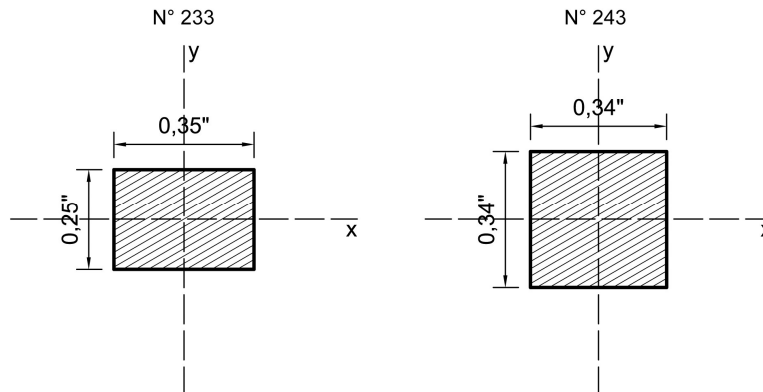


Abb. V. 8: Querschnitte mit Hauptachsen der Proben N° 233 u. N° 243

Gl. V. 41

$$F_{Bruch} = \frac{d_{243} 34}{d_{233} 35} \cdot 45 = 43,714 \text{ Pfund}$$

In einem zweiten Schritt wird die reduzierte Bruchkraft mit dem Verhältnis der Quadrate der Kantenlängen der kurzen Seite aus N° 233 und der aus N° 243 multipliziert:

Gl. V. 42

$$F_{Bruch} = \frac{(d_{243} 34)^2}{(d_{233} 25)^2} \cdot 43,714 = 80,85 \text{ Pfund}$$

Gl. V. 43

$$F_{Bruch} = \frac{d_2^3}{d_{1x} \cdot d_{1y}^2} \cdot F_{d_1}$$

Auch hier konstatiert Musschenbroek:

“[...] *Calculus igitur suppeditat libras 80 gestandas a parallelopipedo Experimenti CCXLIII. eventus docuit libras 81 fuisse sustentatas, qui proinde accuratissime convenit cum calculo.*”⁴⁰

5.4.2 Einordnung der Erkenntnisse Musschenbroeks

Musschenbroek geht in der Auswertung seiner empirischen Datenlage einen entscheidenden Schritt weiter, wenn er zur Deduktion einer Formel den Vorstellungsraum der einfachen Geometriebeschreibung durch reelle Zahlen erweitert. Es war bekannt, dass die Multiplikation zweier Kantenlängen, die normal zueinander in einer Ebene stehen,

Anm.:

Das Verhältnis in der Gl. V. 41 lautet im Original:

$$625,1156 :: 43 \frac{1}{7}, 80$$

und wird als Rundungsfehler korrigiert wiedergegeben.

Übersetzung zu ⁴⁰:

„Für die Berechnung mussten also 80 Pfund vom Parallelepiped als Teil des Experiments Nr. 243 getragen werden. Das Ergebnis zeigte, dass 81 Pfund getragen wurden, was folglich am genauesten mit der Berechnung übereinstimmte.“

⁴⁰ Musschenbroek: COHÆRENTIA CORPORUM FIRMORUM, 1729, S. 661

die Flächengröße ergeben; bei gleichlangen Kanten das Quadrat derselben. Die Einführung der Quadratur der Länge war hingegen eine abstrakte Operation, die den gängigen Vorstellungsraum erweiterte. Sprachlich ist diese Neuerung noch nicht ganz sicher gefasst, wenn er im Fließtext vom *quadratum longitudinis* spricht, was bisher der Flächenberechnung vorbehalten war und in der Zusammenfassung schließlich von der *duplicata longitudinum* spricht und hier nicht den Faktor 2, sondern auch die Quadratur meint.⁴¹

Die dritte Potenz einer Kantenlänge, wie in Gl. V. 40, ist ebenfalls eine abstrakte Operation, da hier nicht das bekannte Volumen eines Würfels beschrieben wurde, sondern der Einfluss der Querschnittsfläche auf das Tragvermögen.

⁴¹ Musschenbroek: COHÆRENTIA CORPORUM FIRMORUM, 1729, S. 660

5.5 Begriff der Schlankheit λ nach Euler

Im Bauwesen ist der Begriff der Schlankheit heute eindeutig quantitativ gefasst und setzt ein abstraktes, mechanisch-mathematisches Verständnis des Stabes als Tragstrukturelement voraus, das zur Beschreibung der Leistungsfähigkeit von Druckstäben dient.

Die mathematischen Grundlagen lieferte hierfür Leonard Euler (1707-1783) mit seiner Veröffentlichung *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minime proprietate gaudentes sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti*⁴² von 1744, in der er die neu entwickelten Lösungsansätze der Variationsrechnung auf elastische Linien anwendete. Nach Kurrer⁴³ war es ein bedeutender Baustein in der von ihm definierten *Applikationsphase* in der Geschichte der Baustatik, wo neue mathematische Verfahren, wie zum Beispiel die Infinitesimalrechnung, sich zur Lösung bekannter Fragestellungen anboten, die bisher durch rein empirische Näherungslösungen unbefriedigend beherrscht wurden.

Straub⁴⁴ hebt hervor, dass Eulers Genie nicht von einer Problemstellung ausgehend nach einer mathematisch exakten Lösung suchte, als vielmehr seine religiös geprägte Weltanschauung die Offenbarung göttlicher Ordnung in mathematischen Gesetzmäßigkeiten zu erkennen glaubte, die er, wie zum Beweis, auf irdische Fragestellungen beispielhaft anwandte.

5.5.1 Eulers analytischer Ansatz

Das Prinzip der Maximal- bzw. Minimalaufgaben verkörperte diese höhere Ordnung beispielhaft, wenn Euler hierzu in der Einleitung zum ersten Additamentarium *De curvis elasticis* ausführt:

*„Schon längst haben einige sehr große Geometer erkannt, dass der Gebrauch der in diesem Buch angegebenen Methode nicht nur in der Analysis selbst sehr groß ist, sondern auch zur Auflösung von physikalischen Problemen ein sehr weitreichendes Hilfsmittel darbietet. Weil nämlich die Gestalt der Welt in höchstem Maße vollkommen ist und vom weisesten Schöpfer geschaffen worden ist, geschieht in der Welt überhaupt nichts, worin sich nicht eine gewisse Art des Maximums oder Minimums zeigt; deswegen besteht überhaupt kein Zweifel, dass alle Wirkungen der Welt aus den Zweck betreffenden Gründen mit Hilfe der Methode der Maxima und Minima gleichermaßen glücklich bestimmt werden können.“*⁴⁵

In diesem Zusammenhang war Eulers Untersuchung in *De curvis elasticis*

Zu ⁴²:

Gustaf Hjalmar Eneström (1852-1923) erstellte ein vollständiges Verzeichnis aller 866 Schriften Eulers, die eine nach ihm benannte Signatur, vergleichbar dem Köchelverzeichnis bei Mozart, tragen. So ist *lineas curvas* 1744 mit E065 signiert.

Zu ⁴⁵:

Die deutsche Übersetzung des lateinischen Originaltextes ist dem Dokument von Alexander Aycock und Artur Diener entnommen. online: <http://eulerarchive.maa.org/translations>, E065de, S. 227. Die Fußnote ⁴⁵ verweist auf die Stelle im lateinischen Quelltext.

⁴² Euler: *lineas curvas*, E065, 1744

⁴³ Siehe: Kurrer: *Geschichte der Baustatik* 2003, S. 24f

⁴⁴ Siehe: Straub: *Geschichte der Bauingenieurkunst*, 1992, S. 115

⁴⁵ Euler: *lineas curvas*, E065, 1744, S. 245

Anm.:

Straub verweist auf eine fehlerhafte Aussage Eulers in den §§37 u. 38 des Additamentums *De curvis elasticis*, „[...] Seine Lösung [Eulers] der Aufgabe ist an sich einwandfrei, nur benützte er die Begriffe «Elastizitätsmodul» E und «Flächenträgheitsmoment» I noch nicht, sondern verwandte anstelle des Produktes E mal I eine einzige von der Stabeigenschaft abhängige Größe, die er «absolute Elastizität [...]» nannte und (für rechteckige Stäbe) fälschlicherweise proportional zum Quadrat statt zur 3. Potenz der Querschnittshöhe annahm.“

Siehe: Straub: Geschichte der Bauingenieurkunst, 1992, S. 114

Diese fehlerhafte Deutung durch Euler selbst, findet tatsächlich erst im §40 explizit statt: „40. [...] Tertio verum crassities laminae plurimum confert ad valorem ipsius Ekk determinandum, quæ ita comparata esse videtur, ut, ceteris paribus, Ekk situ ut crassetiei quadratum. Coniunctim ergo tenebit expresso Ekk rationem compositam ex ratione elateris materiae, latitudinis laminae simplicis, ac duplicata crassetiei laminae. [...]“ Euler: *lineas curvas*, E065, 1744, 269

immer noch eine abstrakte Operation zur Bestimmung von Winkeln, Längen und Flächen. Erst im §37⁴⁶ wird das Tragvermögen von Säulen mit einem baupraktischen Bezug anhand elastischer Kurven der ersten Gattung nach Euler erörtert, siehe Abb. V. 9.

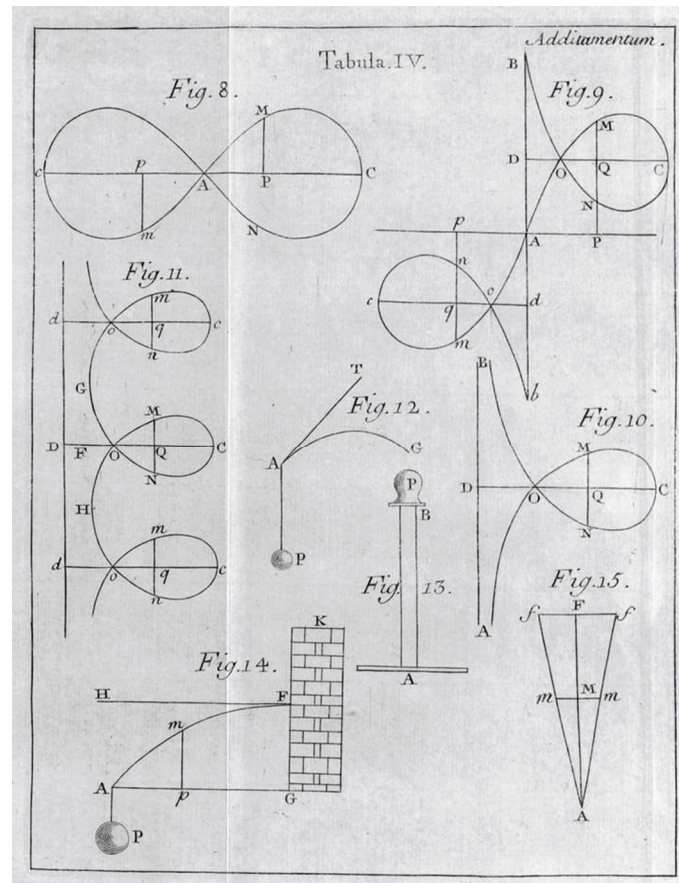


Abb. V. 9: Fig. 13 zeigt eine Säule der Länge AB mit vermutlich quadratischem Querschnitt und generischem Gewicht P

Das von Euler gewählte Beispiel wird anhand eines physischen, maßstabslosen Modellaufbaus illustriert (Abb. V. 9), der die realen Randbedingungen eines Stabes, hier Säule genannt, aus der baupraktischen zeitgenössischen Anwendung übernimmt. Die Säule aus elastischem, monolithischem Material, vermutlich Holz, steht ohne planmäßige Einspannung auf der horizontalen Ebene in Punkt A und bildet ebenso eine horizontale Kontaktfläche in Punkt B mit dem Gewicht P aus. Beide Kontaktflächen stabilisieren das System gegenüber dem Umkippen, wirken aber als unplanmäßige, minimale Einspannung, da ein freies Verdrehen der Stabachse behindert wird.

Das Modell steht im Widerspruch zu den idealisierten Randbedingungen der vollkommenen gelenkigen Lagerung, wie er sie in Abb. V. 10 zur mathematischen Herleitung der Knicklast erkannte. Dieser

⁴⁶ Siehe: Euler: *lineas curvas*, E065, 1744, 267

Widerspruch zwischen dem Modellaufbau und der Modellvorstellung ist insoweit bemerkenswert, als dass Euler mit den Modellaufbauten der eingespannten Bleche eine deutlich höhere Deckung von Theorie und Materialmodell hatte aufzeigen können. Es mag sicherlich daran liegen, dass die damaligen Baukonstruktionen mit stabförmigen Elementen die planmäßige Einspannung durch Eingraben oder Einklemmen kannten und nutzten, dagegen aber der Nutzen idealer Pendelstützen mit punktförmiger Lagerung erst mit den Stützen aus Eisenwerkstoffen erschlossen werden sollte.

Euler untersuchte die in Abb. V. 9 gezeigte Modellanordnung dennoch aus seiner Argumentation heraus konsequent als eine idealisierte elastische Linie (Abb. V. 10) mit beidseitig gelenkiger Lagerung, und kennzeichnete die Elastizität der Linie mit einer *elasticitas absoluta*⁴⁷, in der Formelschreibweise Ekk geschrieben, die E-Modul und Flächenträgheitsmoment zusammenfasste. (Abb. V. 10a)

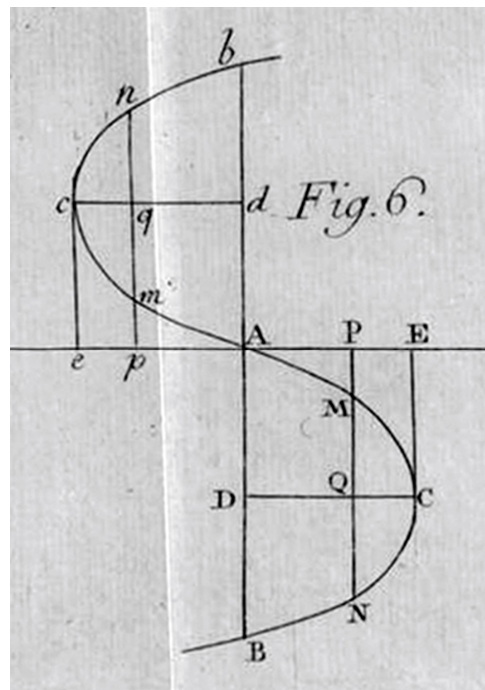


Abb. V. 10: Fig. 6 ist die elastische Kurve erster Gattung nach Eulers Zählweise

Euler gibt die Formel zur Bestimmung der kritischen Last P für gelenkig gelagerte Stützen mit gleichförmiger Querschnittsform und konstanter Elastizität wie folgend an:

Gl. V. 44

$$P = \frac{\pi \pi Ekk}{4ff} = \frac{\pi \pi}{aa} \cdot Ekk$$

Zu 47:

Die *elasticitas absoluta* wird von Euler durch folgenden Versuchsaufbau bestimmt:

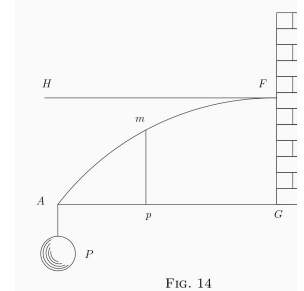


Abb. V. 10a: Experimentelle Bestimmung von Ekk nach Euler

Wobei die Formel

$$Ekk = \frac{Pgg \cdot (2g - 3h)}{6h}$$

Mit P als Gewichtskraft, $g = AG$ und $h = GF$ aus messbaren Größen zum Wert von Ekk führt. Siehe: online: <http://eulerarchive.maa.org/translations>, E065de

Zu Abb. V. 10:

Die gerade Achse der Säule aus Abb. V. 9, Fig. 13, ist $AB = a$, die elastische Linie bzw. die verformte Achse von AB ist mit $ACB = 2f$ bzw. $AMC = f$ gekennzeichnet. Ist der Stuch $DC = c$ infinitesimal klein, ergibt sich $AB = 2f = a$

⁴⁷ Straub: Geschichte der Bauingenieurkunst, 1992, S. 114

Erst in einem Beitrag in der Histoire de l'Académie Royale de Berlin von 1757 mit dem Titel *Sur la force des colonnes*⁴⁸ wurde, nach Straubs Ausführungen, die Knickformel unter Berücksichtigung des zuvor Gesagten in die heutige Form gebracht, wobei der untersuchte Eulerfall 2 die Besonderheit besitzt, dass die Stablänge gleich der Knicklänge ist:

Übersetzung zu ⁴⁹:

"[...] das Gewicht, welches diese Säule tragen kann ohne sich zu krümmen, ist:"

$$\text{Gl. V. 45} \quad \begin{array}{l} [\dots] \text{ le poids que cette colonne est ca-} \\ \text{pable} \\ \text{de soutenir sans se plier, est}^{49} \end{array} = \pi \pi \frac{Ekk}{aa}$$

Schreibweise für den zweiten Eulerfall heute:

$$\text{Gl. V. 46} \quad F_k = \frac{\pi^2 EI}{l^2}$$

Dieser Sonderfall unter den Eulerfällen lässt sich in eine allgemeingültige Form überführen.

5.5.2 Die Euler-Fälle

Nach Leonhardt Euler lässt sich das Versagen eines idealen Druckstabes in vier unterschiedlichen Systemen (Abb. V. 11) mit der Formel

$$\text{Gl. V. 47} \quad N_k = \frac{\pi^2 EI}{s_k^2}$$

zutreffend beschreiben, wenn die Steifigkeit eines geraden Stabes mit $EI = \text{const.}$ über seine gesamte Länge angenommen wird. In dieser allgemeinen Form wird die Knicklänge s_k eingeführt, die sich aus den Wendepunkten der Sinuskurve für vier unterschiedliche Lagerungsarten des Stabes ergibt:

$$\text{Gl. V. 48} \quad \text{Eulerfall 1: } s_k = 2,0 \cdot l$$

$$\text{Gl. V. 49} \quad \text{Eulerfall 2: } s_k = 1,0 \cdot l$$

$$\text{Gl. V. 50} \quad \text{Eulerfall 3: } s_k \simeq 0,7 \cdot l$$

$$\text{Gl. V. 51} \quad \text{Eulerfall 4: } s_k = 0,5 \cdot l$$

⁴⁸ Siehe: Euler: force des colonnes, E238, 1757

⁴⁹ Euler: force des colonnes, E238, 1757, S. 252

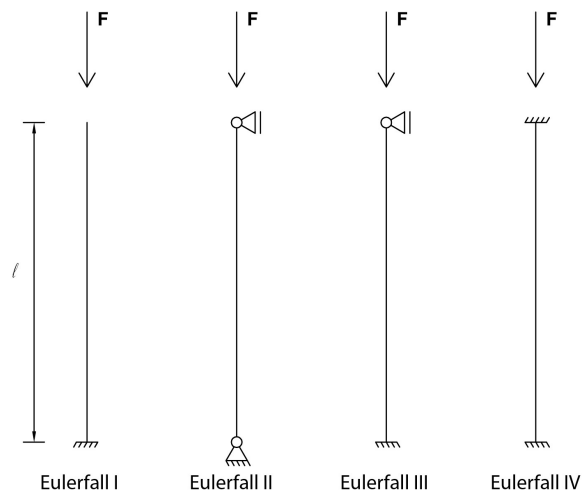


Abb. V. 11: Statische Systeme der Eulerfälle I-IV

Die Formel ergibt eine theoretische Verzweigungslast N_k [kN], nach deren Überschreiten ein spontanes Stabilitätsversagen eintritt. Diese Knicklast lässt sich in eine Knickspannung transformieren, deren Flächenbezug sich in Abhängigkeit zur Verteilung der Flächenanteile auf die Stabachse bezogen erfassen lässt:

Gl. V. 52

$$\sigma_k = \frac{\pi^2 \cdot E}{\lambda^2}$$

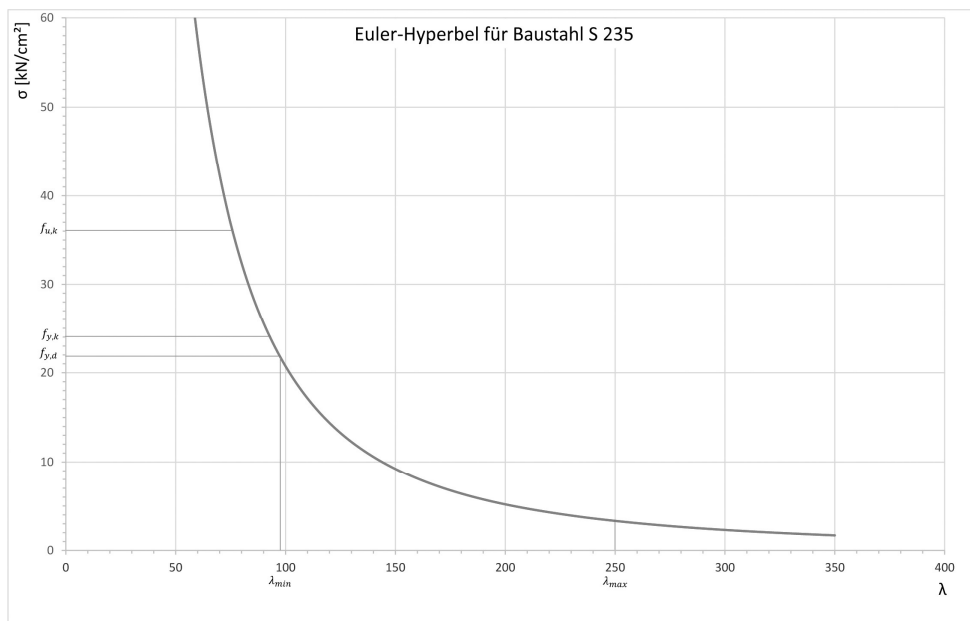


Abb. V. 12: Euler-Hyperbel für Baustahl S 235 mit dem Grenزشlankheitsgrad λ_{min}

Der Trägheitsradius i [cm] ist somit ein Maß der Steifigkeit eines Querschnittes auf seine Flächeneinheiten bezogen.

Gl. V. 53

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}}$$

Der Quotient aus Knicklänge und Trägheitsradius wird die Schlankheit λ [-] genannt.

Gl. V. 54

$$\lambda = \frac{s_k}{i}$$

Anm.:

Bandbreite der üblichen Baustoffe:

• Hölzer

nach EC 5 DIN 1052:2004

Von $E_{0,mean} = 11000 \frac{N}{mm^2}$ bis

$$E_{0,mean} = 17000 \frac{N}{mm^2}$$

• Betone

nach EC 2 DIN 1992-1-1

$$\text{Von } E_{cm} = 27000 \frac{N}{mm^2}$$

$$\text{bis } E_{cm} = 44000 \frac{N}{mm^2}$$

• Aluminium nach EC 9

DIN EN 1999-1-1

$$E = 70000 \frac{N}{mm^2}$$

• Stahl nach EC 3

DIN EN 1993-1

$$E = 210000 \frac{N}{mm^2}$$

Die dimensionslose Schlankheit λ ist danach Ausdruck des Widerstandes eines Druckstabes gegen Stabilitätsversagen und ermöglicht einen quantitativen Vergleich unterschiedlicher Druckstäbe gleichen Materials⁵⁰. Somit ist der Term der Gleichung (Gl. V. 52) zur theoretischen Knickspannung durch die beiden Variablen Werkstoffwahl, ausgedrückt durch das E-Modul, und die gewählte Schlankheit λ anschaulich steuerbar:

Die Wahl des Werkstoffes bewegt sich in einer großen Bandbreite aufsteigend von Holz, Beton, Aluminium zu Stahl und lässt sich so in einer Spanne von $2 \cdot 10^2$ einstellen.

Die Schlankheit λ setzt sich aus dem querschnittsbezogenen Trägheitsradius und dem gewählten System nach Euler zusammen. Die Schlankheit λ bewegt sich dabei in einem sinnvollen Bereich von 20 bis ca. 250 und geht im Nenner zum Quadrat in den Term der Gl. V. 52 ein.

5.5.3 Die historische Bedeutung von λ_{min} und λ_{max}

Am Beispiel der Euler-Hyperbel für den Werkstoff Baustahl S 235 wird gezeigt (Abb. V. 12), wie die Streckgrenze des Materials $f_{y,d}$ die theoretische Knickspannung absolut begrenzt und wie der Einfluss der zunehmenden Schlankheit die relativen Spannungen abnehmen lässt. In der Praxis liegen die zulässigen Spannungen deutlich unterhalb der Kurve, da die Sicherheitskonzepte dem schlagartigen Versagen Rechnung tragen müssen und so die Streuung des tatsächlichen E-Moduls, Eigenspannungen, Inhomogenität, Geometrieabweichungen etc. berücksichtigen.

⁵⁰ Leicher: Tragwerkslehre, 2010, S. 265ff

Das ω -Verfahren, aus den Konstruktionsrichtlinien der Reichsbahn kommend, für den Stahlhochbau am 25.02.1925 in Preußen übernommen, galt der Bemessung von Druckgliedern im Stahlbau. Ein progressiver Sicherheitsfaktor wurde der Schlankheit zuordnet, die sogenannte Knickzahl, die dem Verlauf der Euler-Hyperbel Rechnung trägt. Die DIN 4114⁵¹ verstetigte dieses Verfahren im Stahlbau.

In dieser Konsequenz wurden die geplanten Spannungen auf Seiten der Einwirkung durch den ω -Faktor angehoben und auf die σ_{zul} , heute $f_{y,d}$, des Materials beschränkt. Dabei nahm der ω -Faktor bei zunehmender Schlankheit nichtlinear stark zu und erreichte für den Werkstoff St 37.12 einen Höchstwert von $\omega = 10,55$ bei $\lambda = 250$ und für den Werkstoff St 52 einen Höchstwert von $\omega = 15,83$ bei $\lambda = 250$.

Gl. V. 55

$$\omega \cdot \frac{S}{F} \leq \sigma_{zul}.$$

Die DIN 4114 beschränkte sich in ihrer Anwendung auf Druckstäbe im Bereich von $20 \leq \lambda \leq 250$, der sich deutlich unterhalb des Grenzschlankheitsgrades erstreckte und bot dem Konstrukteur eine leicht quantifizierbare Orientierung über den Bereich zulässiger Konstruktionen im Stahlbau. In der Literatur findet man für die üblichen Druckstäbe aus anderen Werkstoffen, außerhalb der zulässigen Bemessungsverfahren nach Eurocode, immer noch λ -bezogene obere Grenzschlankheitsgrade publiziert, siehe Übersicht Tabelle V. 2.

Zu ⁵¹ bzw. Gl. V. 55:

Die DIN 4114 vom Oktober 1952 verwendet noch die alten Einheiten:

S : den Absolutwert der größten im Stab auftretenden Druckkraft in kg[sic] [...]

F : die unverschwächte Querschnittsfläche des Stabes in cm^2

σ_{zul} : die für den untersuchten Belastungsfall und die gewählte Baustablsorte geltende zulässige Zugspannungen in kg/cm^2 [sic][...]

ω : die von der Baustablsorte und dem Schlankheitsgrad λ abhängige, aus den Tafeln 1 und 2 zu entnehmende Knickzahl

λ : den Schlankheitsgrad des Stabes [...]

Nach DIN 1050 waren St37.12 mit $\sigma_{zul} = 1600 \frac{kg}{cm^2}$ und

St52 mit $\sigma_{zul} = 2400 \frac{kg}{cm^2}$ angegeben.

⁵¹ DIN 4114: Stabilitätsfälle, 1952

Tabelle V. 2: Obere Begrenzung von Schlankheiten im konstruktiven Ingenieurbau

Einteilige Druckstäbe aus Holz	$\lambda_{max} \leq 150$	Leicher: Tragwerkslehre, 2010, S. 276
Einteilige Druckstäbe aus Stahl	$\lambda_{max} \leq 250$	
Stahlbau:		Heller: Padia 1, 1998, S. 410
Im Hoch- und Kranbau	$\lambda_{max} \leq 250$	
Im Brückenbau	$\lambda_{max} \leq 150$ Nur in Ausnahmefällen $\lambda_{max} \leq 200$	
Bei Verwendung von Grauguss	$\lambda_{max} \leq 100$	
Betonbau:		
Bewehrter Beton	$\lambda_{max} \leq 200$	
unbewehrter Beton		
Druckstäbe	$\lambda_{max} \leq 40$	
Wände	$\lambda_{max} \leq 70$	
Holzbau:		
Einteilige Druckstäbe	$\lambda_{max} \leq 150$	
Zusammengesetzte nicht verleimte Druckstäbe	$\lambda_{w max} \leq 175$	
Druckkraft nur als Zusatzlast	$\lambda_{max} \leq 200$	
Fliegende Bauten:		
Druckstäbe mit vorwiegend Ruhender Beanspruchung	$\lambda_{max} \leq 200$	
Zeltstangen zur Verminderung des Durchhanges	$\lambda_{max} \leq 250$	

Das ω -Verfahren wurde durch das κ -Verfahren der DIN 18800 ersetzt, das den Schlankheitsgrad λ_K , entsprechend dem λ nach DIN 4114, durch den bezogenen Schlankheitsgrad $0\lambda_K = \frac{\lambda_K}{\lambda_a}$ ergänzt. Das Bemessungsverfahren legt eine differenzierte Betrachtung zu Grunde, um die Eigenschaften der Stahlwerkstoffe nach Güte, Blechstärkedicke und Walzprofilart angemessen zu berücksichtigen. Grundlage bildeten umfangreiche empirische Versuchsreihen in europäischen Materialprüfanstalten, um die starke Annäherung der Walzprofilsortimente an den ide-

alen Stab statistisch genau erfassen zu können. Ziel war die genaue Einschätzung des Biegeknickverhaltens von Walzprofilen im Vergleich zu den theoretischen Knicklasten, um ein Bemessungsverfahren ausdifferenzieren zu können, das unter Berücksichtigung eines Sicherheitskonzeptes ein wirtschaftlicheres Konstruieren ermöglicht.

Der Bezugsschlankheitsgrad $\lambda_a < 1$ entspricht dabei einem zusätzlichen Faktor, der die Stahlsorte und Blechstärkendicke berücksichtigt und den bezogenen Schlankheitsgrad somit anhebt. Auf Grundlage von $0_{\lambda_K}^-$ wurde anhand einer der vier Knickspannungslinie der Abminderungsfaktor κ bestimmt, der entgegen dem hebenden ω -Faktor auf Seiten der planmäßigen Last, hier die zulässige Normalspannung $N_{pl,d}$ reduzierte. Die Bemessungsformel war erfüllt, wenn

Gl. V. 56

$$\frac{N_d}{\kappa \cdot N_{pl,d}} \leq 1$$

galt.

Das aktuelle χ -Verfahren, nach Euro Code 3 für Biegeknicken, ist dem κ -Verfahren der alten DIN 18800 sehr ähnlich.

Für ein gegebenes System gleicher Stahlgüte und Walzprofilart kann eine zulässige Druckkraft mit den beiden jüngeren Bemessungsverfahren ermittelt werden, die identisch ist. Über einen Vergleich der prozentualen Annäherung dieser zulässigen Druckkraft an die theoretische Knicklast nach Euler für diese Anordnung, lassen sich die beiden Bemessungsverfahren hinsichtlich ihres theoretischen Ausnutzungsgrades beurteilen (Gl. V. 57 bis Gl. V. 60). Geht man von einem 4,5 m langen Pendelstab aus kreisrundem, warmgefertigten Hohlprofil 101,6 x 4 der Stahlgüte S235 aus, ergibt sich $N_k = 149,4kN$.

Gl. V. 57

$$N_k = \frac{\pi^2 \cdot EI}{S_K^2}$$

$$= \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{kN}{cm^2} \cdot 146cm^4}{(450cm)^2} = 149,4kN$$

Gl. V. 58

$$\kappa - \text{Verfahren: } N_{d,max} = 112,62kN$$

$$\Rightarrow 75,38\% \text{ von } N_k$$

Gl. V. 59

$$\chi - \text{Verfahren: } N_{Ed,max} = 112,62kN$$

$$\Rightarrow 75,4\% \text{ von } N_k$$

Gl. V. 60

$$\omega - \text{Verfahren: } S_{max} = 63,7 \text{ kN} \\ \Rightarrow 42,6\% \text{ von } N_k$$

Der Wert der maximal zulässigen Druckkraft nach dem ω -Verfahren erreicht hingegen nur 42,6% gegenüber der theoretischen Knicklast, da hier die zulässige Spannung des Werkstoffes St37.12 mit umgerechnet 15,696 kN/cm² schon deutlich geringer ausfiel.

5.6 Von der Vorstellung der Schlankheit bei Hodgkinson

*“When we consider to what extent pillars of iron and of timber are used for the support of buildings, and reflect that there are no satisfactory rules by which to measure the strength of pillars, it becomes a matter of great importance to obtain such rules by means of experiment, and, if possible, to discover the laws on which they are founded.”*⁵²

Mit diesen Worten leitete Eaton Hodgkinson (1789-1861) seinen Artikel *Experimental Researches on the Strength of Pillars of Cast Iron, and Other Materials* in den Philosophical Transactions der Royal Society London 1840 ein. Fast 100 Jahre nach Eulers mathematischem Modell war es nicht gelungen, *satisfactory rules* für die baupraktische Bemessung aufzustellen, obwohl die Materialfestigkeiten für Eisenwerkstoffe seit Muschenbroek und Hooke (1635-1703) ausreichend genau ermittelt worden waren. Hodgkinsons Artikel schildert den empirischen Ansatz zur Ermittlung einer Bemessungsformel für massive und hohle Querschnitte aus Gusseisen. Die zeitgenössische Relevanz dieser baupraktischen Fragestellung wurde durch die großzügige Unterstützung durch den Industriellen und Ingenieur William Fairbairn (1789-1874) erfasst und bewältigt. Es verband Hodgkinson eine langjährige gemeinsame Forschertätigkeit mit dem vermögenden und erfolgreichen Ingenieur Fairbairn, der gemeinsam mit ihm schon Untersuchungen zu Eisenträgerquerschnitten⁵³ in den 1830er Jahren durchgeführt hatte. Hodgkinsons zitierte Feststellung kann daher als kompetent gelten, da er aus seiner eigenen Forschertätigkeit und seinem Austausch mit den zeitgenössischen Fachleuten einen profunden Überblick über die theoretischen und baupraktischen Kenntnisse in der führenden Industrienation Großbritanniens seiner Zeit hatte.

5.6.1 Hodgkinsons empirischer Ansatz

Hodgkinsons methodischer Ansatz ist stark empirisch geprägt. Er hatte wohl Kenntnis von Eulers Theorie, die seit ihrer Erstveröffentlichung 1744 in verschiedenen Publikationen⁵⁴ auch kommentiert wiederveröffentlicht wurde, und so auch Eingang in seinen Artikel fand. Dennoch war seine Skepsis gegenüber ihrer Anwendbarkeit groß, sodass er eigene Versuchsreihen durchführte, die Stützen aus Gusseisen vom Typ Low Moor N° 3 mit massiven und hohlen Querschnitten bis zum Bruch belasteten, siehe Abb. V. 14. Die ausführliche schriftliche und illustrierte Beschreibung der Prüfmaschine (Abb. V. 13), Maßnahmen

Anm.:

Das historische Gusseisen vom Typ Low Moor N° 3 entspricht einem Gusseisen mit Lamellengraphit wie z.B. GG30 EN-JL1050 mit $E = 108\text{--}137\text{ kN/mm}^2$ und $f_{u,k} = 77,1 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$

⁵² Hodgkinson: Strength of Pillars, 1840, S. 385

⁵³ Siehe: Hodgkinson: Forms of Iron Beams, 1831, S. 407ff

⁵⁴ Siehe: De La Grange: Sur la Force des Ressorts Pliés, 1769

zur zentrischen Krafteinleitung an den Probekörpern und deren Dokumentation bis in die Genauigkeit von $1/100$ mm sind streng wissenschaftlich angelegt. Die Probekörper sind aus praktischen Gründen nicht großmaßstäblich. Die massiven Stützen haben eine maximale Länge von 153,67 cm und einen minimalen Querschnitt von 1,27 cm und die Hohlstützen eine maximale Länge von 230,505 cm und einen minimalen äußeren Querschnitt von 4,5212 cm bei einer Wandstärke von ca. 7 mm.

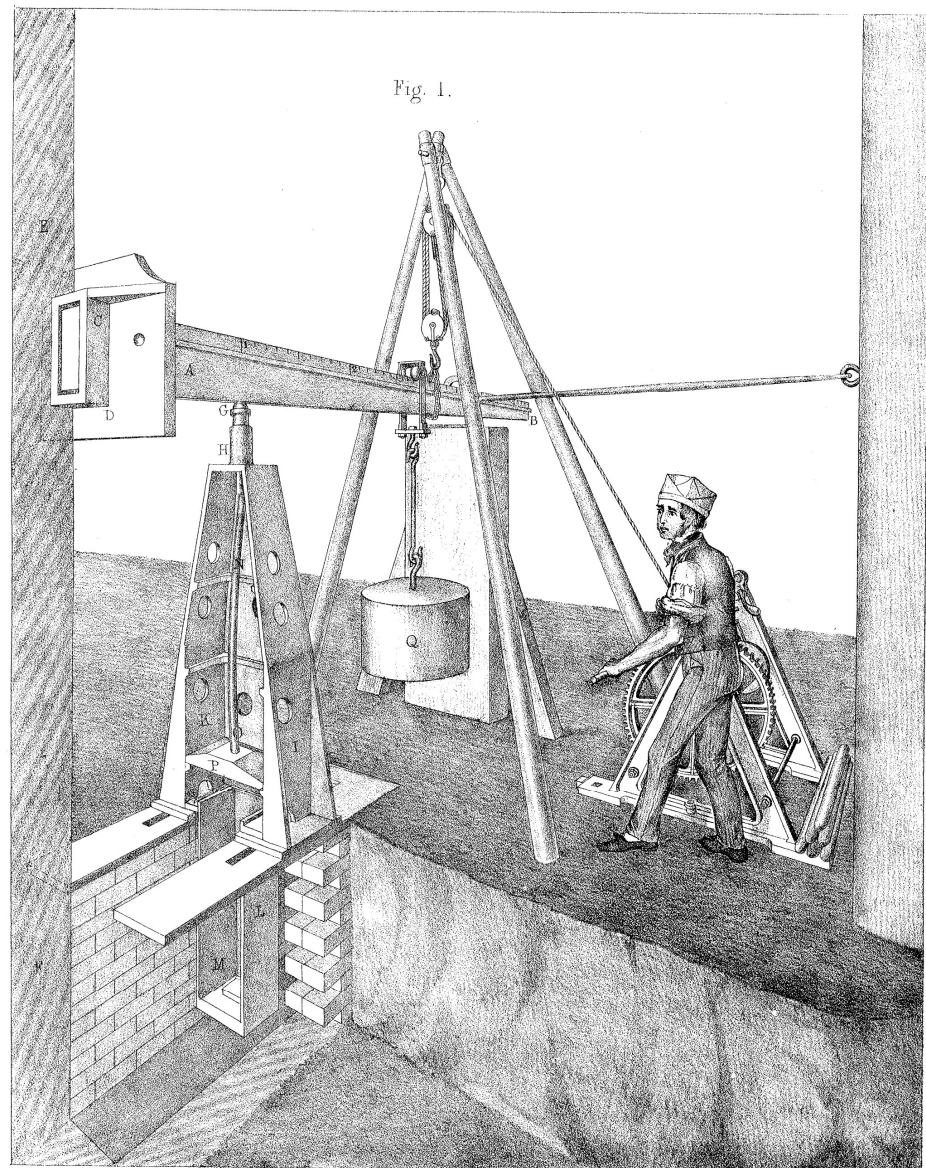
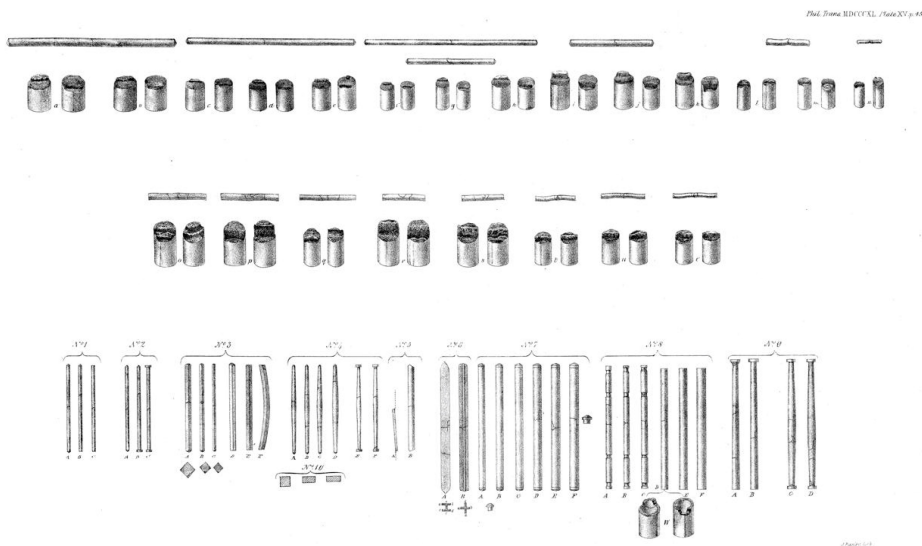


Abb. V. 13: Prüfmaschine von Hodgkinson und Fairbairn, 1840

Die erste Versuchsreihe mit abgerundeten Enden der Stützen richtete sich nach den theoretischen Grundsätzen und bildet den Eulerfall II ab. Die folgenden Reihen sind aber in der Ausformung der Endstücke

Seine Interpretationen der Beobachtungen (Abb. V. 14) verfolgten zunächst einen Vergleich zwischen den Stützen mit abgerundeten Enden und denen mit glatten, geraden Enden. Er konnte einen linearen Zusammenhang aufzeigen: Stützen mit flachen Enden tragen das 3,167fache an Last gegenüber Stützen gleicher Dimension mit abgerundeten Enden, wenn ihre Schlankheit über 1:30 liegt. Das Ergebnis kann mit dem quasi linearen Verlauf in der Euler-Hyperbel für große λ 's erklärt werden. Entsprechen die Stützen mit abgerundeten Enden dem Eulerfall II, so sind die Stützen mit glatten Enden einer Biegefigur zwischen Eulerfall II und IV anzusiedeln und eine Erhöhung der Tragfähigkeit ist nachvollziehbar, die somit einen linearen Zusammenhang der ermittelten Daten seiner Interpretation Grundlage boten.



Seine eigentliche Bemessungsformel wurde aber erst durch das Verhältnis zweier Stützendurchmesser bei gleicher Länge zu ihren Bruchlasten induktiv entwickelt:

Gl. V. 61

$$\frac{1,765''}{0,5''} = \frac{3,530}{1}$$

Das Verhältnis der Bruchlasten dieser Durchmesser:

$$\text{Gl. V. 62} \quad \frac{15560\text{lbs}}{143\text{lbs}} = \frac{108,81119}{1}$$

Ermittlung des Exponenten n als Verknüpfung des Durchmesser-
verhältnisses zu dem der Bruchlasten:

Anm.:

Die in Gl. V. 63 dargestellten Nachkommastellen sind exakter und weichen von denen von Hodgkinson ermittelten Nachkommastellen ab, da er vermutlich die logarithmischen Operationen mit Hilfe von Tabellenwerken lösen musste; der von Hodgkinson errechnete Wert lautet im Original: $n = 3,718$ für diese Gleichung. Der von ihm ermittelte Durchschnittswert $n = 3,76$ wurde hier aber nicht korrigiert.

$$\text{Gl. V. 63} \quad 3,53^n = \frac{15560}{143}$$

$$\Rightarrow n = \frac{\log 15560 / 143}{\log 3,53} = 3,7180862$$

Dieser Exponent wurde von Hodgkinson aus mehreren experimentell ermittelten Datenpaaren errechnet und als ein Durchschnittswert mit $n = 3,76$ für Gusseisenstützen, Typ Low Moor N°3, mit abgerundeten Enden und einer Schlankheit $> 1:15$ festgelegt⁵⁵.

Das gleiche Vorgehen wurde mit konstantem Durchmesser und variabler Länge wiederholt.

Das Verhältnis zweier Längen in Zoll:

$$\text{Gl. V. 64} \quad \frac{60,5''}{3,78125''} = \frac{16}{1}$$

Das Verhältnis der Bruchlasten dieser Durchmesser:

$$\text{Gl. V. 65} \quad \frac{15560\text{lbs}}{143\text{lbs}} = \frac{108,81119}{1}$$

Anm.:

Die in Gl. V. 66 dargestellten Nachkommastellen sind exakter und weichen von denen von Hodgkinson ermittelten Nachkommastellen ab, da er vermutlich die logarithmischen Operationen mit Hilfe von Tabellenwerken lösen musste; der von Hodgkinson errechnete Wert lautet im Original: $x = 1,6807$ für diese Gleichung. Der von ihm ermittelte Durchschnittswert $x = 1,7$ wurde hier aber nicht korrigiert.

Ermittlung des Exponenten x als Verknüpfung des Längenverhältnisses zu dem der Bruchlasten:

$$\text{Gl. V. 66} \quad 16^x = \frac{15560}{143}$$

$$\Rightarrow x = \frac{\log 15560 / 143}{\log 16} = 1,6914208$$

⁵⁵ Hodgkinson: Strength of Pillars, 1840, 396ff

Hier wurde der ermittelte Durchschnittswert für $x = 1,7$ angegeben; Gusseisenstützen, Typ Low Moor N°3, mit abgerundeten Enden und einer Schlankheit $> 1:15$ ⁵⁶.

Der Weg zur Verallgemeinerung seiner Formel wurde durch die Festlegung eines Standard-Bezugskörpers von einem Fuß Länge und einem Zoll Durchmesser beschritten. Seine Bruchlast wurde rechnerisch auf Grundlage der vorliegenden Daten ermittelt[!] und legte das Basisverhältnis seiner Gleichung fest, die immer nur für eine bestimmte Lagerungsart Gültigkeit hat. Die Bruchlast von Stützen des gleichen Werkstoffes, bei gleicher Lagerung und beliebiger Dimension des Durchmessers und variierendem Durchmesser sollten danach rechnerisch ermittelbar sein.

Das w [lbs] ist hier die gesuchte Bruchlast einer Stütze, x [lbs] die Bruchlast der Standardstütze:

$$\text{Gl. V. 67} \quad \frac{d^{3,76}}{l^{1,7}} : \frac{1^{3,76}}{1^{1,7}} :: w : x$$

$$\text{Gl. V. 68} \quad \therefore x = \frac{wl^{1,7}}{d^{3,76}}$$

$$\Rightarrow w = \frac{x \cdot d^{3,76}}{l^{1,7}}$$

Für den Werkstoff Low Moor N°3 wurde von Hodgkinson eine Bruchlast für den Standardzylinder mit abgerundeten Enden von 33379 lbs rechnerisch[!] ermittelt. Die Bemessungsformel lautet daher:

$$\text{Gl. V. 69} \quad w[\text{lbs}] = 33379[\text{lbs}] \frac{d^{3,76}[\text{Zoll}]}{l^{1,7}[\text{Fuß}]}$$

Hodgkinson bilanzierte seine Gebrauchsformel mit folgenden Worten:

*„This easy rule would nearly in all cases give the strength somewhat under the real strength, as appears from the instances we have cited, and others we might take from the abstract”*⁵⁷

⁵⁶ Hodgkinson: Strength of Pillars, 1840, S. 398ff

⁵⁷ Hodgkinson: Strength of Pillars, 1840, S. 404

5.6.2 Einordnung der Erkenntnisse Hodgkinsons

Implizit wurde hier von Hodgkinson ein Sicherheitsfaktor unbestimmter Größe eingeführt, wenn er die errechnete Größe der Bruchlast in jedem Fall unter der realen sah.

Der hier verwendete Begriff der Schlankheit als das Verhältnis von Durchmesser zur Länge, ist bei massiven Querschnitten mit gleicher Lagerung dem λ -Wert proportional. Dagegen sind die Schlankheiten von Hodgkinson bei unterschiedlicher Lagerung nicht vergleichbar, da die Lagerung eine Randbedingung ist, die nicht selbst Bestandteil der Formel ist.

Hodgkinson zeigte den Kontext seiner Exponenten $n = 3,76; x = 1,7$ auf, wenn er erklärte, dass in der Eulerformel das Flächenträgheitsmoment 2. Grades die Einheit $[cm^4]$ hat und die Länge (Knicklänge) in der zweiten Potenz in die Formel eingeht. Für ihn als Empiriker gab es zunächst keinen Unterschied zwischen der theoretischen Knicklast nach Euler und der praktisch bestimmbaren, weil das empirisch ermittelbare Ergebnis nach seiner Auffassung einen höheren Erkenntniswert hat als das theoretische. Für ihn galt:

Zu Gl. V. 70:
 N_k : Eulerlast [kN]
 N_{experi} : Bruchlast aus Versuch [kN]

$$\text{Gl. V. 70} \quad N_k := N_{\text{experi.}} \text{ anstatt: } N_k \gg N_{\text{experi.}}$$

Im Umkehrschluss bewertete er selbstbewusst Eulers Exponenten als realistisch, da sie in der Nähe seiner Werte lagen.

5.6.3 Persistenz des Hodgkinson'schen Ansatzes

Eine Fortführung fand dieser experimentelle Ansatz unter Vernachlässigung der theoretischen Grundlagen Eulers durch M. Love, der 1852 in Frankreich in seinem Artikel *Mémoire sur la Résistance du fer et de la fonte et l'emploi de ces métaux dans les constructions*⁵⁸, folgende Bemessungsformel angab:

Zu Gl. V. 71:
 $C = S \cdot K$
 R : zulässige Traglast in kg
 S : Querschnittsfläche in cm^2
 K : Druckfestigkeit ein Sechstel der Bruchfestigkeit von $7500 kg/cm^2$ Gusseisen
 L : Länge in Metern
 D : Außendurchmesser in Metern
 Im Kapitel 8.4.1 über die Eignung von Hohlprofilen werden die Interaktionsdiagramme von Barré ausführlich besprochen.

Gl. V. 71

$$R = \frac{C}{1,45 + 0,00337 \left(\frac{L}{D}\right)^2}$$

In einem späteren Artikel⁵⁹ von 1870 wurden auf Grundlage seiner Formel zwei umfangreiche Interaktionsdiagramme zur Bemessung von massiven und hohlen Gussstützen von M. Barré vorgestellt, die das einfache Verständnis einer proportional verstandenen Schlankheit weiterführten.

⁵⁸ Love: *Résistance de la fonte*, 1852, S. 42

⁵⁹ Barré: *Résistance des colonnes*, 1870, S. 194

Noch 1876 wurde in Ludwig Klasens *Handbuch der Hochbau-Construktionen in Eisen und anderen Metallen*⁶⁰ eine verfeinerte empirische Formel von Hodgkinson zur Bemessung von Gussstützen zitiert, die bereits einen Sicherheitsfaktor von 6-facher Sicherheit vorsah:

Gl. V. 72

$$P = 10,676 \frac{D^{3,6} - d^{3,6}}{l^{1,7}}$$

Hodgkinsons Anliegen, eine für die Praxis relevante Bemessungsformel für Gussstützen zu formulieren, schien gut 36 Jahre nach seiner ersten Veröffentlichung immer noch eine gewisse Relevanz zu besitzen.

⁶⁰ Siehe: Klasen: Hochbau-Construktionen in Eisen 1876, S. 133

5.7 Die Relative Konstruktive Schlankheit λ nach Frei Otto

Die Forschergruppe um Frei Otto (1925-2015) begann mit der Publikation *IL 21 Grundlagen Form-Kraft-Masse*⁶¹ eine Zusammenstellung einer eigenen Systematik zur Beschreibung und Analyse der physischen Umwelt zu publizieren. Ausgangspunkt war eine deskriptive analytische Darstellung der Objekte aus Natur und Technik und der Offenlegung ihrer vermuteten Interdependenzen aus Form, Kraft und Masse. Das methodische Vorgehen kann mit einer Phänomenologie auf Grundlage des *common sense* umschrieben werden. Beobachtungen aus der Umwelt wurden in einfacher, aus dem Alltag entlehnter Sprache anschaulich geschildert und in einen Ursachen-Wirkungszusammenhang gestellt, der sich nur im geringen Umfang höherer Theoriebezüge bedient. Das sprachliche Verständnis wird durch Piktogramme und gegenständliche Strichzeichnungen als erklärende Illustrationen flankiert. Die *IL 21* Reihe *Form-Kraft-Masse* mit ihren Bänden 1 bis 5, führte neben Klassifikationen auch quantitative Begriffe ein, die im Band 4 *das Prinzip Leichtbau* zur Bewertung von Leichtbauprinzipien herangezogen werden. In diesem Zusammenhang wurde eine eigene Definition der *relativen konstruktiven Schlankheit* λ mit der Einheit $[\frac{m}{\sqrt{N}}]$ eingeführt⁶².

Danach ist:

Zu Gl. V. 73:

F_{Bruch} : Bruchkraft in N

λ : relativen konstruktiven
Schlankheit []

S : Kraftweg in m

Gl. V. 73

$$\lambda = \frac{S}{\sqrt{F_{Bruch}}}$$

Die Strecke S steht für den direkten Kraftweg einer Bruchkraft F_{Bruch} durch einen Körper. Bei einem Druckstab entspricht das der unverformten Länge des Stabes als Tragwerkselement vor seiner Belastung. Die Quadratwurzel der Bruchkraft ist der Tatsache geschuldet, dass die proportionale Vergrößerung von Körpern eine Zunahme der Querschnittsfläche zur zweiten Potenz entspricht. Am Beispiel zweier Druckstäbe, der erste mit 5 m Länge und einem kreisförmigen Querschnitt von 0,5 m Radius und der zweite mit 10 m Länge und einem kreisförmigen Querschnitt von 1 m Radius, haben danach die gleichen Proportionen in diesem Sinne; der zweite Stab wurde aus dem ersten mit dem Faktor 2 skaliert. Versagt der zweite Stab bei einer vierfachen Druckkraft gegenüber der des ersten Stabes, so haben beide Stäbe die gleiche, *Relative Konstruktive Schlankheit* λ nach Frei Otto. (Abb. V. 15)

⁶¹ Otto: *IL 21 Grundlagen Form-Kraft-Masse*, 1979

⁶² Otto: *IL 21 Grundlagen Form-Kraft-Masse*, 1979, S. 44f, bzw. Siehe: Otto: *IL 24 Prinzip Leichtbau*, 1997

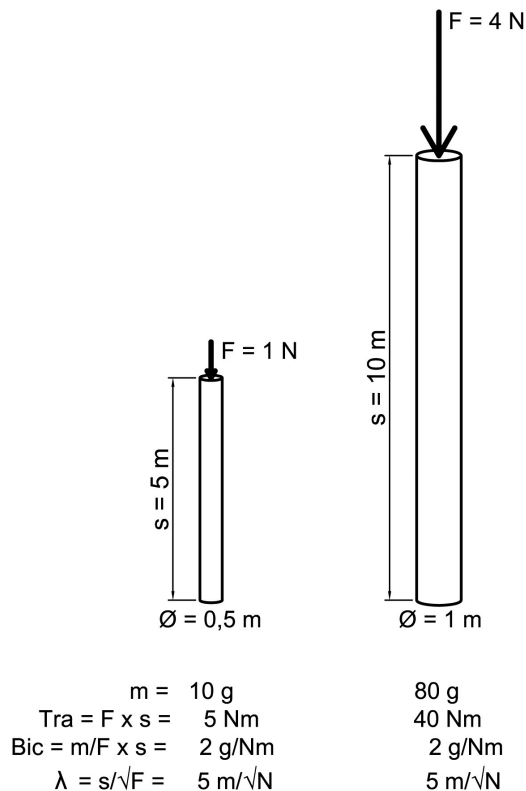


Abb. V. 15: Aussagekraft der Relativen Konstruktiven Schlankheit nach Frei Otto

5.7.1 Das Bic- λ -Diagramm

Von Frei Otto wurden gemäß seinem deduktiven Ansatz materielle Objekte auf ihre Fähigkeit untersucht, Kräfte aufzunehmen und weiterleiten zu können. Zunächst unabhängig von Form und Aggregatzustand kann dieser Zusammenhang mit einem standardisierten Kraftübertragungsweg, kurz Tv [Nm], ausgedrückt werden, der sich aus dem Produkt der Strecke und der übertragenen Kraft ergibt. Ist die Grenztragfähigkeit eines Körpers erreicht, spricht man von Tra [Nm] eines Körpers. Die Masse des kraftübertragenden Körpers wird im Bic [$\frac{g}{Nm}$] mit seinem Tra ins Verhältnis gesetzt.

Gl. V. 74

$$Bic = \frac{m}{Tra} = \frac{m}{F \cdot s}$$

Es lassen sich so quantifizierbare Aussagen zur Leistungsfähigkeit von Körpern, bezogen auf ihre Masse bei gegebener Belastungsart treffen. Für eine Normalkraftbeanspruchung auf Zug können beispielsweise vergleichende Grammzahlen für verschiedene Werkstoffe ermittelt werden, die benötigt werden, um 1 Newton über die Distanz von einem Meter zu leiten. Die relative Schlankheit wird in diesem Zusammen-

hang zur Vergleichbarkeit von Körpern auf Druck- und Biegespannungen im *Bic- λ -Diagramm* aufgetragen; nur bei Körpern mit gleicher relativer Schlankheit ist ein aussagekräftiger Vergleich der *Bic*-Werte gegeben.

Das *Bic- λ -Diagramm* ist zunächst eine Notationsmethode für empirisch ermittelte Bruchkräfte bei Druckstäben. Die Randbedingung der Lagerung und die der Querschnittsgeometrie wird im Kommentartext des IL 24⁶³ genannt, wie z.B. gelenkig gelagert; Druckstäbe in Form von Röhren und Vollrundstäben finden aber keinen Eingang in den Formelterm. Somit können nur deduktive Aussagen getroffen werden, die bedingt für gleichartige Systeme linear interpolierbar sind (Abb. V. 16). Der Empirie immanent, sind hier Größe der Versuchsserie, Verlässlichkeit des Versuchsaufbaus und die Messgenauigkeit entscheidende Voraussetzungen für eine belastbare Verallgemeinerung der Ergebnisse.

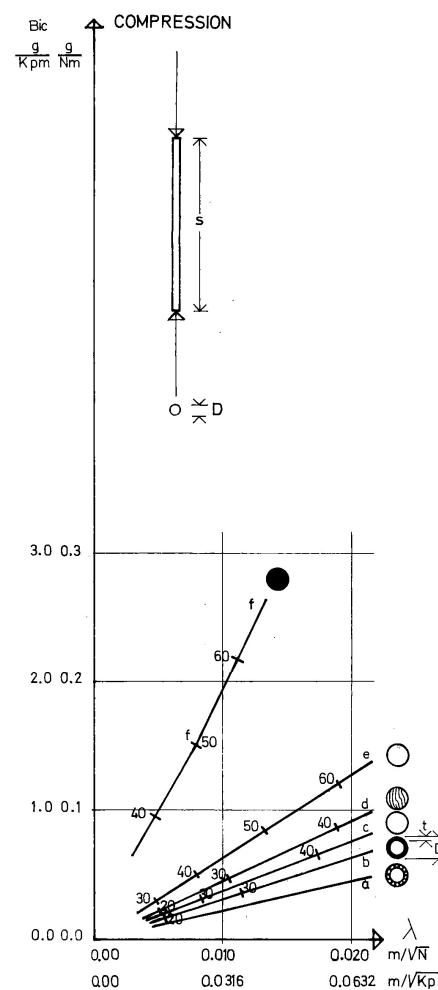


Abb. V. 16: Bic-Lambda-Diagramm für gelenkig gelagerte Druckstäbe, Frei Otto

⁶³ Otto: IL 24 Prinzip Leichtbau, 1997

Tabellenverzeichnis Kapitel 5:

Tabelle V. 1: Proportionsangaben für Stäbe verschiedener Autoren. Aus: Verfasser / Inhalt
siehe Fußnoten Text

Tabelle V. 2: Obere Begrenzung von Schlankheiten im konstruktiven Ingenieurbau. Aus:
siehe Angabe in Tabelle selbst

Abbildungsverzeichnis Kapitel 5:

Abb. V. 1: Biegelinien bei exzentrischer Belastung, Leonardo da Vinci. Aus: Archivale Leonardo: Codex Madrid I, S. 177v, Biblioteca Nacional Madrid, digitale Kopie: www.leonardodigitale.com, Ausschnitt, 1490-1499

Abb. V. 2: Korrelation der Tragfähigkeit zur Schlankheit zweier Stützen, linke Figuren, Leonardo da Vinci. Aus: Archivale Leonardo: Codex Atlanticus, S. 410r, Biblioteca Ambrosiana Mailand, digitale Kopie: www.leonardodigitale.com, Ausschnitt hier gespiegelt dargestellt, 1478-1518

Abb. V. 3: Zweites Beispiel Leonardos zur Korrelation der Tragfähigkeit zur Schlankheit zweier Stützen. Aus: Archivale Leonardo: Codex Paris A, S. 49r, Institute de France Paris, digitale Kopie: www.leonardodigitale.com, Ausschnitt, 1492

Abb. V. 4: Positive Korrelation der Tragfähigkeit zur Schlankheit verschiedener Stützen, Leonardo da Vinci. Aus: Archivale Leonardo: Codex Paris A, S. 46v, Institute de France Paris, digitale Kopie: www.leonardodigitale.com, hier gespiegelt dargestellt, 1492

Abb. V. 5: Korrelation der Tragfähigkeit zur Querschnittsänderung über die Höhe verschiedener Stützen, Leonardo da Vinci. Aus: Archivale Leonardo: Codex Atlanticus, S. 890r, Biblioteca Ambrosiana Mailand, digitale Kopie: www.leonardodigitale.com, Ausschnitt, 1478-1518

Abb. V. 6: Versuchsaufbau für Knickversuche, Musschenbroek 1729. Aus: Van Musschenbroek, Petri: *PHYSICÆ EXPERIMENTALES, ET GEOMETRICÆ, DE MAGNETE; TUBORUM CAPILLARIUM VITREORUMQUE SPECULORUM ATTRACTIONE, MAGNITUDE TERRÆ, COHÆRENTIA CORPORUM FIRMORUM*, Hrsg. Samuelem Luchtmans, Leiden, 1729 TAB XXVII

Abb. V. 7: Theoretische Hyperbelkurve zu Musschenbroeks PROPOSITIO CXVIII. Aus: Verfasser

Abb. V. 8: Querschnitte mit Hauptachsen der Proben N° 233 u. N° 243. Aus: Illustration des Verfassers nach Beschreibung Musschenbroeks ebd.

Abb. V. 9: Fig. 13 zeigt eine Säule der Länge AB mit vermutlich quadratischem Querschnitt und generischem Gewicht P . Aus: Euler, Leonhard: *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes, sive solutio problematis isoperimetrici latissimum sensu accepti*, Lausanne, Genf, E065, 1744, Tafel IV

Abb. V. 10: Fig. 6 ist die elastische Kurve erster Gattung nach Eulers Zählweise. Aus: Euler, Leonhard: *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes, sive solutio problematis isoperimetrici latissimum sensu accepti*, Lausanne, Genf, E065, 1744, Tafel III

Abb. V. 10a: Experimentelle Bestimmung von EKK nach Euler. Aus: <http://eulerarchive.maa.org/docs/translations/E065de.pdf>; S. 256-258, [Zugriff: 04.01.2018; 14:50], S. 256

Abb. V. 11: Statische Systeme der Eulerfälle I-IV. Aus: Verfasser

Abb. V. 12: Euler-Hyperbel für Baustahl S 235 mit dem Grenzschlankheitsgrad λ_{\min} . Aus: Verfasser

Abb. V. 13: Prüfmaschine von Hodgkinson und Fairbairn, 1840. Aus: Hodgkinson, Eaton: Experimental Researches on the Strength of Pillars of Cast Iron, and Other Materials, In: Philosophical Transactions Royal Society London 1840 130, 385-456, published 1 January 1840, Tafel XIII; verfügbar unter: <http://rstl.royalsocietypublishing.org/search?fulltext=Strength+of+Pillars&submit=yes&andorexactfulltext=and&x=0&y=0> [Zugriff: 01.04.2016]

Abb. V. 14: Spezimen von Hodgkinson und Fairbairn in der Übersicht. Aus: Eaton: Experimental Researches on the Strength of Pillars of Cast Iron, and Other Materials, In: Philosophical Transactions Royal Society London 1840 130, 385-456, published 1 January 1840, Tafel MDCCCXL; verfügbar unter: <http://rstl.royalsocietypublishing.org/search?fulltext=Strength+of+Pillars&submit=yes&andorexactfulltext=and&x=0&y=0> [Zugriff: 01.04.2016]

Abb. V. 15: Aussagekraft der Relativen Konstruktiven Schlankheit nach Frei Otto. Aus: Verfasser nach Frei Otto

Abb. V. 16: Bic-Lambda-Diagramm für gelenkig gelagerte Druckstäbe, Frei Otto. Aus: Hrsg. Frei Otto: IL 21 Grundlagen Form-Kraft-Masse. Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, Nr. 21, 1979, S. 49

6.0 Darstellung von physischen Stäben

Mit der *Darstellung* von physischen Stäben ist zunächst ein neutraler Begriff für die Herstellung gewählt worden, da der Begriff *Herstellung* auf einen schöpferischen Akt des Menschen hinweist und Prozesse zur Formgebung im Sinne von gestaltfesten Stäben in der Natur ausschließt.

6.1 Genuine Stäbe

In der Natur werden feste Stab-Elemente durch zwei unterschiedliche Prozesse geformt: Zum einen durch biologische Formbildungsprozesse, die noch nicht vollständig verstanden werden und zum anderen durch rein physikalische Formbildungsgesetze in der unbelebten Materie, welche vom aktuellen naturwissenschaftlichen Standpunkt aus gut verstanden werden.

Zu Letzteren gehören z.B. das generative Kristallwachstum, osmotische Prozesse und degenerative Erosionsprozesse. Im Folgenden sollen nur solche genuinen Stab-Elemente aus biologischen Formbildungsprozessen betrachtet werden, die in Form, Größe und Material für die Verwendung durch den Menschen für Bauaufgaben geeignet erscheinen. Sie können ausschließlich der Meso- und Makro-Maßstabsebene zugeordnet werden; die Fasern der Mikro-Maßstabsebene von Textilien werden hierzu nicht betrachtet.

In erster Linie waren es Skeletteile von Tieren und Gehölz, die erst nach einem Verarbeitungsschritt, dem Schlachten beziehungsweise Fällen, zur Verfügung standen. Knochen sind in ihrem natürlichen Kontext durch Sehnen und Muskeln miteinander verbunden beziehungsweise als Horn mit den Knochen direkt verwachsen, Äste und Stämme sind durch ihren hölzernen Verwuchs kraftschlüssig verbunden; diese Verbindungen müssen zuerst gelöst werden, um ein Stab-Einzelelement zu erhalten. War der ursprüngliche konstruktive Kontext erst einmal zerstört, standen lange Zeit kaum Technologien zu seiner Wiederherstellung zur Verfügung. Eine Ausnahme bildeten die Hölzer mit ihren gewachsenen Vergabelungen, die eine geometrische Besonderheit gegenüber den stabförmigen Knochen mit ihren abgerundeten Gelenkkugelköpfen darstellen, da sie sich bei der konstruktiven Fügung als hilfreich erwiesen.

6.1.1 Technische Verwendung von genuinen Stäben

Die ersten primitiven Verwendungen von Stab-Elementen zu Bauzwecken waren vermutlich gleichbedeutend die Palisade mit ihrer Reihung

von senkrechten Stäben durch Eingraben oder Einrammen, das Abdecken von Gruben, das Zusammenbinden mit Riemen zu Gerüsten, das Unterspannen als Mast von Membranen¹ aus tierischen Häuten und das Flechtwerk als Wände. Die Bauaufgaben beschränkten sich auf Unterkünfte, deren Verteidigung und rituelle Orte. Neben dem Bauwesen wurden zuvor erste Werkzeuge ergänzend zum Faustkeil aus Stäben gefertigt. Die ältesten Wurfspeere² lassen sich bereits vor 400 000 Jahren in der Region Helmstedt nachweisen, und in der Region Ahrensburg³ fand man die ältesten hölzernen Bogen mit Pfeilen aus dem frühen Mesolithikum.

Siehe hierzu Abb. X.5

Im Bauwesen kann man in dieser Frühphase schon zwischen einer effektiven Anwendung der Stäbe als Gerüst oder Mast auf der einen Seite und der weniger effektiven, kumulativen Anwendung als Palisade unterscheiden, wobei die linearen, unverbundenen Einzelelemente eine pseudohafte Platten- und Scheibenwirkung erzielen. Das Flechtwerk aus Zweigen stellt eine Besonderheit dar, da beim Flechtwerk flexible Stäbe in einer Weise miteinander verbunden werden, sodass ein flächiges Element entsteht, das sich in seinen Eigenschaften vom einzelnen Element abhebt. Die natürlichen Ausgangsprodukte waren in ihrer Dimension und Materialität beschränkt. Die Art der Bearbeitung konnte stark variieren und erreichte bis heute beachtliche Lösungen, wie seilverspannte Holzmaste bei Segelschiffen und räumlich komplexe Konstruktionen aus Bambus. Diesen Konstruktionen sind häufig starke Verformungen eingeschrieben, die dennoch keine Einschränkung ihrer Gebrauchstauglichkeit in ihrem soziokulturellen Kontext darstellten.

¹ Burkhardt: Zeltarchitektur, 1986

² Thieme: Die ältesten Speere, 2005

³ Rust: Stellmoor, 1943

6.2 Synthetische Stäbe

Als synthetische Stäbe werden danach alle Stab-Elemente bezeichnet, die nicht unmittelbar, das heißt durch subtraktive Verfahren wie Abtrennen, Spalten etc. aus genuinen Stäben, wie Knochen und Hölzer, oder indirekt aus amorphen, massiven Material wie z.B. Naturstein hergestellt werden können.

Die beschränkte Auswahl an natürlichen Werkstoffen der genuinen Stäbe ist einer großen Bandbreite an Werkstoffen für synthetische Stäbe gewichen. Eine übliche Einteilung der Werkstoffgruppen für synthetische Stäbe erfolgt nach⁴:

- a) Metalle
- b) Polymere
- c) Elastomere
- d) Gläser
- e) Keramiken
- f) Hybride

Anm.:

Auch für unbelebte Materie sind Selbstorganisationsprozesse in Form von Kristallwachstum und osmotischen Prozessen bekannt, die aber für diese Maßstabsebenen keine praktische Bedeutung haben.

Es ist kennzeichnend für die Verarbeitung dieser Werkstoffgruppen zu Stab-Elementen der Meso- und Makro-Maßstabsebene, dass das amorphe Ausgangsmaterial geformt werden muss. Aufgrund der Unbelebtheit sind zu Zeit noch keine Selbstorganisationsprozesse aktivierbar.

Die Formgebungsverfahren können unterschieden werden nach:

- i) Gießen
- ii) Umformen
- iii) Zerspanen
- iv) Extrudieren
- v) Schweißen/Sintern
- vi) Verkleben
- vii) Assemblieren (Schrauben, Niete etc.)
- viii) Weben, Wickeln etc.

Die Formgebungsverfahren sind daher definitorisch vorrangig gegenüber der Werkstoffgruppe, da auch Stäbe aus vorwiegend natürlichen Werkstoffen, wie z.B. Brettschichtholz, erst durch die Verleimung vi) die gewünschten Eigenschaften erhalten. Der Formgebungsprozess besteht häufig aus einer Abfolge einzelner Formgebungsverfahren aus i) – viii).

6.2.1 Technische Verwendung von synthetischen Stäben

Die technischen Anwendungen von synthetischen Stäben sind vielfältig und weisen über den Anwendungsbereich des Bauwesens hinaus. Im

⁴ Siehe: Ashby: Materials Selection, 2011, S. 33

Bauwesen war es besonders die hohle Gusssäule, die eine Eisenarchitektur mitbegründet⁵, gefolgt von der Stahlbetonbauweise, die die genuinen Stäbe aus Holz im konstruktiven Hochbau zurückdrängten.

Der Metallguss aus der Schmuck- und Waffenfabrikation wurde schon lange beherrscht und ließ sich daher prinzipiell einfach auf die Herstellung von hohlen Gusssäulen übertragen. Dem gegenüber konnten aus den traditionellen Schmiedeverfahren keine Formgebungsverfahren für lange, nahtlose Stahlrohre abgeleitet werden. Die notwendige Innovationskraft zur Entwicklung und Beherrschung von Formgebungsverfahren im industriellen Maßstab ist besonders an grundlegenden in- und ausländischen Patenten zur Röhrenfabrikation aus duktilen Eisenwerkstoffen zu belegen. Bousse⁶ publiziert 1908 eine tabellarische Zusammenfassung von ca. 500 Patenten zur Fabrikation von Röhren, die er, beginnend 1812 mit Henry Osborns (o.J.-1827) feuergeschweißten Rohren, bis in seine Gegenwart fortführte. Die Patente können hierzu zwei unterschiedlichen Strategien zugeordnet werden:

- a) Verfahren zur Verbesserung der Eigenschaften der Naht bei geschweißten Rohren aus Blechen
- b) Verfahren zur nahtlosen Fabrikation von Rohren

Bousse verwies⁷ dabei auf die Fachzeitschrift der Metallröhren-Industrie, die systematisch aus dem englisch-, französisch- und deutschsprachigen Raum über 2000 Patente bis 1908 zusammentragen konnte.

Zu 6:

Die technischen Entwicklungsschritte werden in den Kapiteln 7, 8 u. 9 genauer vorgestellt.

Anm. zu 7:

Diese Quellenangabe Bouses konnte nicht nachvollzogen werden.

6.2.2 Die aktuellen Herstellungsverfahren für Stahlhohlprofile

Die aktuellen Herstellungsverfahren für Stahlhohlprofile und Leitungsrohre aus Stahl können grundsätzlich nach den o.g. Strategien weiterhin unterschieden werden, wobei die Schweißverfahren soweit optimiert werden konnten, dass eine Annäherung an die Güte der nahtlosen Hohlprofile erreicht wird.

In der Literatur finden sich umfangreiche Darstellungen der industriellen Herstellungsverfahren^{8,9} und ihrer technischen Anlagen. Zur Herstellung nahtloser Hohlprofile und Rohre kommen im Wesentlichen folgende Verfahren zum Einsatz:^{10,11}

- 1) Schrägwalz-/Pilgerschrittverfahren (Mannesmannverfahren):
Lochen mit gleichsinnig laufenden Schrägwalzen und Dornstange; Elongieren mit konisch kalibrierten Walzen in alternierender Vor- und Rückwärtsbewegung zur Walzrichtung in den

⁵ Siehe: Schädlich: Eisen in der Architektur, 2015

⁶ Bousse: Die Fabrikation nahtloser Stahlrohre, 1908

⁷ Siehe: Bousse: Die Fabrikation nahtloser Stahlrohre, 1908, S. 332

⁸ Dutta: Hohlprofil-Konstruktionen, 1999, S. 19ff

⁹ Köhler: Merkblatt 224, 1975

¹⁰ Siehe: Dutta: Hohlprofil-Konstruktionen, 1999, S. 19

¹¹ Siehe: Brensing: Herstellungsverfahren, o.J.

Arbeitsschritten konisches Pilgermaul, zylindrischer Glätteteil und Leerlaufkaliber. Ein Pilgerdorn gibt den Innendurchmesser vor.

- 2) Stoßbankverfahren (Erhardt-Verfahren):
Lochen des Rundknüppels in der Lochpresse mit Lochdorn; Elongieren im Streck-Schrägwalzwerk mit Dornstange. In der Stoßbank, bestehend aus antriebslosen Rollenkäfigen mit abnehmendem Kaliber, wird das Vorrohr mit Hilfe der Dornstange hineingestoßen.
- 3) Stopfenwalzverfahren (Stiefel-Verfahren):
Lochen im Schrägwalzwerk; Elongieren in der Stopfenstraße, wo zwei tonnenförmige Schrägwalzen in Kombination mit zwei Führunglinealen über einem Innendorn den Walzspalt bilden.
- 4) Strangpressverfahren:
Lochen des Vormaterials im zylindrischen Aufnehmer mit anschließender Extrusion am Matrizenboden des Aufnehmers durch den sich bildenden Ringspalt aus Lochdorn und Matrize.
- 5) Rohrkonti-Walzverfahren:
Lochen im Stopfenwalzverfahren; Elongieren der Rohrluppe auf einer freilaufenden Dornstange in einer Walzlinie mit abnehmendem Kaliber.
- 6) Press- und Ziehverfahren:
Lochen in der Presse zum Hohlblock mit Boden; Elongieren durch Abstrecken in der Ziehpresse. Mit Hilfe des Dorns wird der Hohlblock durch den Ziehring gestoßen; dieser Vorgang wird mit Austausch des Zieh rings bis zur Zielgröße wiederholt.

Es handelt sich um warme Formgebungsverfahren; das Ziehen von Rohren erfolgt dagegen auch kalt und führt zu einer Kaltverfestigung – beide Verfahren entsprechen ii). Die Außendurchmesser beginnen mit Subzentimetern und erreichen im Press- und Ziehverfahren bis zu 1450 mm. Die Wandstärken sind auch in einem weiten Bereich von wenigen Millimetern bis zu mehreren Zentimetern einstellbar. Dutta nennt dagegen einen maximalen Außendurchmesser von 660 mm, der sich noch wirtschaftlich darstellen lässt. Die Herstellungsverfahren 1) – 6) ergänzen einander, da jedes Verfahren einen wirtschaftlichen und technischen Qualitätsbereich mit einem anderen Schwerpunkt abdeckt. Dieser wird definiert durch den Durchmesser, die Wanddicke und den benötigten Toleranzen.¹²

Die Zylindergeometrie von Hohlprofilen und Rohren aus Flachblechstreifen kann einerseits durch eine kontinuierliche Umformung zu einem sogenannten Schlitzrohr erfolgen oder durch eine spiralförmige Aufwicklung quer zur Rohrachse. Durch einen nachgeschalteten kontinuierlichen Schweißprozess wird das Schlitz- oder Spiralrohr erst in einen kraftschlüssigen Kreisringquerschnitt überführt.

¹² Dutta: Hohlprofil-Konstruktionen, 1999, S. 19

Neben den kontinuierlichen Verfahren gibt es auch diskontinuierliche Verfahren für Schlitzrohre, wie das UOE-Verfahren, bei dem abgelängte Bleche größerer Stärke durch Pressen in Zylinderform gebracht werden, eine Längsschweißnaht erhalten und abschließend durch Expansion auf den gewünschten Durchmesser gedehnt werden.

Eine Besonderheit sind dünnwandige Spiralrohre für Lüftungsleitungen, bei denen das Blech durch einen Falzprozess kraftschlüssig verbunden wird. Die Namensgebung zur Unterscheidung dieser Verfahren wird vorrangig durch den gewählten Fügungsprozess (Unterpulver, Schutzgas-, Feuerpress- oder Elektrisches-Press-Schweißverfahren) geprägt; Schlitz- bzw. Spiralrohr sind häufig aus dem Kontext der Anwendung selbstredend.

6.2.3 Normen

Der Begriff *Rohr* bzw. *Röhre* ist im technischen Kontext unspezifisch und daher Gegenstand einer differenzierten Normierung durch das Deutsche Institut für Normung e.V., kurz DIN genannt. Die DIN hat ihren nationalistischen Charakter aus den Gründungsjahren ab 1917 hinter sich gelassen und ist im Rahmen des europäischen Binnenmarktes und des Weltmarktes an der Harmonisierung der Normen im Austausch mit dem Comité Européen de Normalisation (CEN) und der International Organization for Standardization (ISO) beteiligt und für deren Publikationen, mit ggf. nationalem Anhang, im Geltungsbereich der Bundesrepublik Deutschland zuständig.

Die Normung ist ein fortlaufender Prozess, der die naturwissenschaftlichen und wirtschaftlichen Gegebenheiten widerspiegelt und in Form von „*Empfehlungen für einwandfreies technisches Verhalten im Regelfall*“¹³ häufig rechtsverbindliche Grundlage in Verträgen ist¹⁴.

Die Spezifizierung der Begriffe *Rohr* bzw. *Röhre* kann grundsätzlich nach folgenden Kriterien DIN-gerecht erfolgen:

- a) Anwendungszweck
- b) Art des Werkstoffes
- c) Geometrie des Querschnitts
- d) Verarbeitung des Werkstoffes

Für die Werkstoffgruppe der unlegierten Stähle und der Querschnittsgeometrie kreisförmig ergibt sich eine Vielzahl von Anwendungsgebieten mit eigenen Normfamilien.

Die EN 10266¹⁵, in ihrer deutschen Fassung, ist den Grundbegriffen Rohr und Hohlprofil für den Stahlbau gewidmet. Nach 2.1 ist

¹³ o.A.: Einführung in die DIN-Normen, 2008, S. 4

¹⁴ Siehe: o.A.: Einführung in die DIN-Normen, 2008, S. 4

¹⁵ Siehe: EN 10266: Stahlrohre und Hohlprofile, 2003

ein Rohr ein „*langes, an beiden Enden offenes Hohlzeugnis mit beliebig ausgeführtem Querschnitt*“.¹⁶ Ein Hohlprofil für den Stahlbau ist nach 2.2 ein „*Rohr, das zur Anwendung im Stahlbau vorgesehen ist*“¹⁷.

Der Begriff *Hohlprofil* setzt sich zunehmend in Abgrenzung zu den Rohrleitungsprofilen durch und wird durch die Normenreihe, bestehend aus der DIN EN 10210-1/2¹⁸ für warmgefertigte Hohlprofile und der DIN EN 10219-1/2¹⁹ für kaltgefertigte Hohlprofile, auf europäischer Ebene für die Anwendung im Euro Code 3 harmonisiert.

Werden Rohrleitungsquerschnitte mit dem strömungsgünstigen kreisrunden Querschnitt als Regelquerschnitt assoziiert, so werden dagegen die Querschnittsformen kreisförmig, quadratisch/rechteckig und elliptisch bei Hohlprofilen für den Stahlbau in dieser Normenreihe nebeneinander aufgeführt. Die genormten Kurzbezeichnungen werden heute aus dem Englischen abgeleitet:

- 1) DIN EN 10210-1:2006:
 - a. z.B. für den Werkstoff: EN 10210-S275JOH
 - b. Querschnittsform:
 - i. HFCHS: hot fabricated circular hollow section
 - ii. HFRHS: hot fabricated rectangular hollow section
 - iii. HFEHS: hot fabricated elliptical hollow section
- 2) DIN EN 10219-1:2006:
 - a. z.B. für den Werkstoff: EN 10219-S275JOH
 - b. Querschnittsform:
 - i. CFCHS: cold fabricated circular hollow section
 - ii. CFRHS: cold fabricated rectangular hollow section

Die Verwendung abweichender Hohlquerschnitte ist bei Berücksichtigung der einschlägigen Zulassungsverfahren im konstruktiven Hochbau grundsätzlich möglich, sodass bei Nachweis der sicheren Handhabung in der Herstellung und der ausschließlichen Verwendung gemäß Prüfzeugnis auch z.B. Präzisionsrohre nach DIN EN 10305²⁰ zur Anwendung kommen können.

¹⁶ EN 10266: Stahlrohre und Hohlprofile, 2003, S. 4

¹⁷ EN 10266: Stahlrohre und Hohlprofile, 2003, S. 4

¹⁸ DIN EN 10210-1: Warmgefertigte Hohlprofile, 2006 / DIN EN 10210-2: Warmgefertigte Hohlprofile, 2006

¹⁹ DIN EN 10219-1: Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile, 2006 / DIN EN 10219-2: Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile, 2006

²⁰ DIN EN 10305-1: Präzisionsstahlrohre, 2016

6.3 Exkurs Urhütte

Neben der fakten- und indizienbasierten archäologischen, neuzeitlichen Betrachtungsweise der historischen Entwicklungslinie der Verwendung von genuinen Stäben als unbearbeitete Bauelemente bzw. Tragwerkselemente natürlichem Ursprungs, gab es in der historischen Architekturtheorie seit Vitruvius immer wieder spekulative, mythologische Bezüge zu einer sogenannten *Urhütte* aus vorwiegend rohen Hölzern, deren Ursprung in die vorgeschichtliche Zeit verlegt wurde. Dieser *initium topos* stellt ein wichtiges Motiv im Selbstverständnis der abendländischen Kulturleistungen dar.



Zu Abb. VI. 1:

Neumeyer kommentiert die Abbildung mit folgenden Worten:

„Der Stich von Charles Eisen zeigt als Frontispiz [...] die wohl bekannteste allegorische Darstellung der Urhütte. Die antik gekleidete Frauengestalt im Vordergrund verkörpert die Natur als Baumeisterin, die der Muse der Architektur das Wesen der Baukunst offenbart. Anders als in der Beschreibung Laugiers, ruht das Dach hier allerdings nicht auf vier abgeschlagenen und in den Boden gerammten Stämmen, sondern auf fest verwurzelten Bäumen. Damit umgibt Laugier das konstruktive Problem der horizontalen Aussteifung und der Verankerung im Boden, an dem fast alle Urhüttenmodelle vor und nach ihm krankten.“²⁰

Abb. VI. 1: Allegorische Darstellung der Urhütte als Ausgangspunkt aller Architekturen²¹

Grundannahme ist ein qualitativer Entwicklungsschritt vom tierischen, instinktiven Verhalten der vorgeschichtlichen Menschen zum *homo faber*. Dieser Entwicklungsschritt wird an der Errichtung von ersten primitiven Hütten aus Ästen, Stöckern und Bäumen, als gewissermaßen erste Hochbauten, gegenüber den tierischen Höhlen und Grubenbauten als kulturelle Leistung festgemacht.²² Unabhängig von den verschiedenen Weltanschauungen der Autoren von Architekturtraktaten

²¹ Neumeyer: Architekturtheorie, 2002, S. 162

²² Siehe: Schützeichel: Ursprung der Architektur, 2009, S. 46-51

herrschte darüber Einigkeit, dass die gewachsenen Hölzer als besonders geeignet erschienen, den ersten Menschen als Baumaterial zu dienen. Diese implizite Selektion schloss denkbare Alternativen, wie tierische Häute etc., aus. Dieser spekulativen Annahme stehen archäologische Befunde aus der Terra Amata bei Nizza gegenüber, die tatsächlich frühe Schutzhütten aus Ästen und Zweigen bereits vor 400 000 v.Chr. nachweisen konnten²³, ohne dass hierin der Anfang alles Bauens von der Wissenschaft gesehen wird.

Die konstruktive Genese der Urhütte wurde von den spekulativen Architekturtheoretikern auf unbearbeitete oder sogar lebendige Hölzer zurückgeführt (Abb. VI. 1), da sie einen der Natur inhärenten Bauprozess darin sahen. Die Erklärungsmodelle verschiedener Quellen zu den Ursprüngen, dem Material und den Veranlassungen zur Errichtung dieser Urhütten, werden in Joseph Rykwerts Publikation *On Adam's House in Paradise*²⁴ von 1972 auf verschiedenen Ebenen kunstgeschichtlich ausführlich verhandelt.

Joseph Rykwert schreibt dem Traumbild einer Urhütte eine durch die Architekturgeschichte nachvollziehbare Wirkmächtigkeit in der Theoriebildung und Baupraxis zu, ohne den Zweifel darüber aufkommen zu lassen, dass

„[...]Es kann kein erstes Haus gegeben haben, dessen Existenz sich durch Archäologen bestätigen ließe. Sie könnten nicht einmal nachweisen, an welchem Ort es sich befunden haben soll. Damit das gelänge, müssten sie den Garten Eden finden.“²⁵

Heinrich Klotz stimmt ihm zu, wenn auch er sagt:

„[...]Die Frage nach der >Urhütte< als einer idealen Grundform (die es nicht gab) verbindet sich mit der Frage nach den Anlässen (den Auslösefaktoren) der Bautypendifferenzierung (die wir nachvollziehen können)“²⁶

Rykwerts Zusammenstellung und Analyse verschiedener historischer Quellen zum Themenkreis Urhütte umfasst aber auch direkte deskriptive oder illustrative Schilderungen der Tektonik von Urhütten im Diskurs der Architekturtheorie, was die wichtige Rolle von Stäben als Bauelementen im Gedankengebäude der Architekturtheorie über ihre Ursprünge belegt. Es wird aufgezeigt, wie Vitruvius mit seinen *Zehn Büchern über Architektur* als archimedischer Punkt gelten kann, der erst durch schöpfungsgeschichtliche Umdeutungen im Kontext der Bibel zu idealisierten Vorstellungen über die Urhütte führte, die heute als naturwissenschaftlich unhaltbare Phantasien gelten. Über Jahrhunderte

²³ Klotz: Von der Urhütte zum Wolkenkratzer, 1991, S. 17ff

²⁴ Siehe: Rykwert: Adams Haus im Paradies, 2005

²⁵ Rykwert: Adams Haus im Paradies, 2005, S. 14

²⁶ Klotz: Von der Urhütte zum Wolkenkratzer, 1991, S. 8

bildeten sie aber die Legitimation für Architekturtraktate verschiedener Provenienz – bis in die atheistischen, aber metaphysischen Ansichten eines Le Corbusiers (1887-1965) über seinen Ursprung allen Bauens. Es ist an dieser Stelle interessant anzumerken, dass der Großteil der historischen Traktate eine direkte Linie von der Urhütte mit Stäben als Tragwerkselemente aus lebendigen Hölzern zu den Säulenordnung spannt, ohne dabei den offensichtlichen Widerspruch im Tragverhalten einer steinernen Säule versus der zum Vorbild erklärten verwurzelten Stämme und eingespannten Hölzer der Urhütte kritisch dekonstruiert zu haben, was erst durch spätere Autoren geschah. Rykwerts Erwähnung von Halls Analogiebildung von hölzernen Stützstangen/Ruten, beobachtet im Weinbau, als Ursprung der Gotik (Abb. VI. 2) kann in diesem Sinne beispielhaft kritisch in Frage gestellt werden²⁷, wie sie in Abb. VI. 2 skizziert ist.

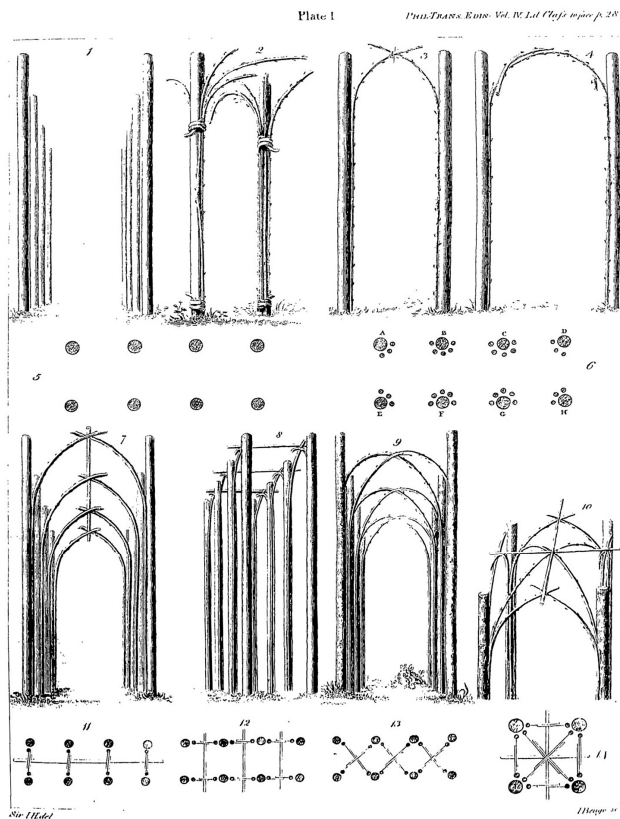


Abb. VI. 2: Studien zur Vorbildfunktion gebogener Geäfte für die gotische Tektonik

Dagegen unternimmt Vitruvius selbst einen, aus heutiger Sicht fast schon rational zu nennen, Versuch, Bauaufgaben und Baumaterialien in einen entwicklungsgeschichtlichen Kontext zu stellen. Die kulturelle Leistung des Bauens ist nach seinem Dafürhalten eine kontinuierliche Entwicklung, bedingt durch das menschliche Bedürfnis nach Schutz und Unterkunft; den Klimazonen entsprechend, die den Rahmen für

²⁷ Siehe: Rykwert: Adams Haus im Paradies, 2005, S. 115

die Qualität des Schutzbedürfnisses und den zur Verfügung stehenden Materialien bilden. Es werden keine mythologischen, oft dem Götterreich zugeordneten, Initialisierungsanalogien bemüht, wie sie uns von anderer Stelle überliefert werden:

„So erfand Prometheus das Feuer; Daidalos die Säge und die Skulptur; Palamedes das Alphabet und die Spielwürfel; Jubal die Musik und Tubal-Kain alle Formen von Metall-Arbeiten.“²⁸

Vitruvius' Argumentation ist zweischichtig aufgebaut. Zum einen berief er sich auf ein scheinbar etabliertes, sachliches Interesse der Gelehrten in diesem Sinne, wenn er das Kapitel mit folgenden Worten einleitet:

„[...]Ehe ich aber zu der Erklärung jener naturwissenschaftlicher Gegenstände schreite, will ich Einiges über die ursprüngliche Erscheinung der Bauwerke, wie sie sich im Beginne entwickelt und ihre erste Anlage sich allmählich weiter entfaltet hat, vorausschicken und werde hierbei dem Entwicklungsgange der Naturzustände der Vorzeit und den Anschauungen jener Gelehrten mich anschließen, welche die ersten Regungen der menschlichen Bildung und Erfindungsgabe mit Sorgfalt nachgeforscht und in ihren Lehrbüchern uns hinterlassen haben.“²⁹

Und andererseits gebraucht er einen deduktiven Ansatz, der noch im Zwanzigsten Jahrhundert als wissenschaftlich galt, wenn er primitive Völker seiner Gegenwart als Zeugen eines primitiven vorzeitlichen, allgemeingültigen Ursprungs des Bauens anführt, wie er beispielhaft die Kolcher auf der Krim in Abb. VI. 3 studierte.

Beide Argumentationsstränge nennen gleichberechtigt neben dem Erdaushub und dem Lehmhub, das Bauen mit unbearbeiteten Hölzern als eine der ursprünglichsten Bauarten. Vitruvius scheint sich auf die zeitgenössische Gelehrtenmeinung zu beziehen, wenn er ausführt:

„[...] so begann eine Anzahl aus ihrem Kreise [Anm.d.V.: der vorzeitlichen Menschen], aus belaubten Zweigen sich Hütten zu errichten, andere am Fuße der Berge Höhlen auszugraben, während wieder andere, indem sie Nester der Schwalben und deren Bauart nachahmten, aus Lehm und Strauchwerk Wohnstätten zur Unterkunft bereiteten.“³⁰

Das konstruktive Potential von unbearbeiteten Stäben aus Holz mit ihren Vergabelungen wurde danach wie folgend erschlossen:

„[...] Im Anfange beschränkte man sich gabelförmig endende Stützhölzer aufzurichten, deren Zwischenräume man mit Reisern ausfüllte, [...]“³¹

²⁸ Rykwert: Adams Haus im Paradies, 2005, S. 14

²⁹ Vitruvius: Zehn Bücher über Architektur, 1987, S. 53

³⁰ Vitruvius: Zehn Bücher über Architektur, 1987, S. 56

³¹ Vitruvius: Zehn Bücher über Architektur, 1987, S. 56

Seinen deduktiven Ansatz will er mit Beschreibungen der zeitgenössischen Blockhausbauweise der Kolcher³² auf der Krim stützen, Abb. VI. 3, wenn er auch hier wieder das Bauen mit Baumstämmen als Zeuge eines vorzeitlichen Bauens herausstellt.

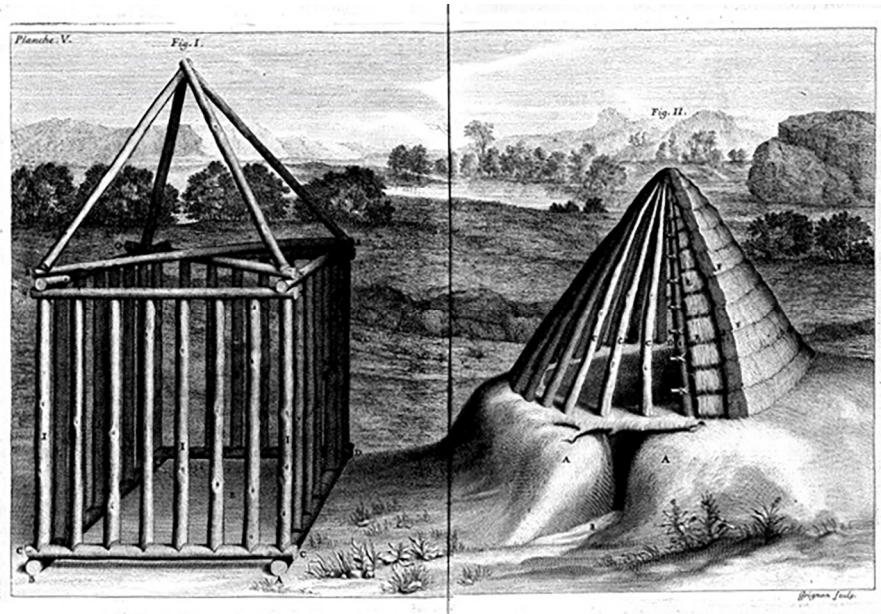


Abb. VI. 3: Blockbauweise der Kolcher auf der Krim nach Beschreibung Vitruvs bei Perrault, 1673

Aus nüchterner, technischer Sicht braucht die Allegorie der Urhütte(n!) ein gewisses Maß an Komplizenschaft, da ihre bildhafte oder deskriptiven Darstellungen zum Teil gravierende Mängel in der Detailausführung oder gar der Standsicherheit aufweisen³³. Eine umfangreiche Zusammenstellung von Urhütten-Konstruktionen kann man bei Joachim Gaus³⁴ studieren.

Dieser Exkurs zeigt aber, dass die vorgeschichtliche Verwendung des hölzernen Stabes im Bewusstsein verschiedener Kulturepochen war und seine Beschaffenheit sich für eine *Realistische Allegorie* bestens eignete und das breite Spektrum des Tragverhaltens von steif bis biegeweich abgebildet wurde.

³² Siehe: Vitruvius: Zehn Bücher über Architektur, 1987, S. 57

³³ Siehe: Neumeyer: Architekturtheorie, 2002, S. 162

³⁴ Siehe: Gaus: Die Urhütte, 1971

Abbildungsverzeichnis Kapitel 6:

- Abb. VI. 1: Allegorische Darstellung der Urhütte als Ausgangspunkt aller Architekturen. Aus: Laugier, Marc Antoine: Essai sur l'architecture. par le P. Laugier, de la Compagnie de Jesus, Paris, 1755, <http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-128>
- Abb. VI. 2: Studien zur Vorbildfunktion gebogener Geäste für die gotische Tektonik. Aus: Sir Hall, James: Essay on the origin and principles of Gothic architecture. Bart. ... From the Transactions of the Royal Society of Edinburgh. Edinburgh, 1797, Plate I
- Abb. VI. 3: Blockbauweise der Kolcher auf der Krim nach Beschreibung Vitruvs bei Perrault, 1673. Aus: Perrault, Claude: Vitruvius. [Übers.] Les Dix Livres D'Architecture De Vitruve : Corrigez Et Traduits nouvellement en Français, avec des Notes & des Figures. [Cicognara Nr. 727] Stich von Grignon, Paris, 1673

7.0 Berührungspunkte der Entwicklungslinien von Rohren und Hohlprofilen

Nachdem herausgestellt werden konnte, dass das kreisrunde Rohr aufgrund seiner Geometrie eine optimale Form für normalkraftbeanspruchte Pendelstützen darstellt, wird der Frage nachgegangen, warum dieses Effektivitätspotential erst spät im 18. Jahrhundert durch die ersten Gussstützen für das Bauwesen erschlossen wurde. Auch das spätere kreisrunde Hohlprofil aus Walzstahl bedarf dieser differenzierten Betrachtung in dieser Frage. Im Folgenden ist es daher notwendig, die technikgeschichtlichen Entwicklungslinien von Rohren disziplinübergreifend offenzulegen, da die Anfänge und wichtige Impulse für die Herstellungsprozesse von Rohren im Allgemeinen aus den Disziplinen Apparat-/Maschinenbau und den Infrastrukturprojekten der Wasser- und Gasversorgung kamen.

7.1 Historische Produktionsarten von Metallrohren

Die Entwicklungsgeschichten für die vielfältigen Anwendungsgebiete von röhrenförmigen Strukturelementen sind im Speziellen gut erforscht und in der Literatur ausführlich besprochen. Beispielhaft kann hier die wissenschaftliche *Frontinus Gesellschaft*¹ genannt werden, die sich der Erforschung und Dokumentation antiker und historischer Ver- und Entsorgungsleitungen widmet.

Anm.:

Die Strukturform des Rohres ist hinsichtlich seiner Verwendungen vielfältig; Größe, Material und Herstellungsprozess sind auf keine ursprüngliche Berufsgruppe singular zurück zu führen.

Die *Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers*² von Denis Diderot (1713-1784) und Jean Baptiste le Rond d'Alembert (1717-1783), begonnen 1751, ist dagegen ein historisches, fundamentales Übersichtswerk, das die Herstellung und Verwendung von röhrenförmigen Strukturelementen aus Metallen im Waffen-, Maschinen- und Musikinstrumentenbau in der Übergangszeit von der Manufaktur zum industriellen Prozess erstmals offenlegt, ohne jedoch die vielfältigen Herstellungsprozesse und Anwendungen von Metallrohren vergleichend gegenüberzustellen. Vorausgegangen waren naturwissenschaftliche und technische Übersichtswerke, wie zum Beispiel das mehrbändige *Theatrum Machinarum*³ von Jacob Leupold (1674-1727) ab 1724, die die Verwendung von Röhren im Wasserbau und Messinstru-

¹ online: www.frontinus.de/portrait

² Diderot/d'Alembert: *Encyclopédie*, Bd. 1, 1751

³ Leupold: *Theatrum Machinarum*, 1724

mentenbau belegen, ohne deren Herstellung zu thematisieren. Die *Technologische Encyclopädie*⁴ von Johann Prechtel (1778-1858), ab 1830, beschreibt im Wesentlichen vier Verfahren für die Erzeugung von Röhren: das Gießen, Ziehen, Abbiegen und das Formen des Töpfers. Für Röhren aus Metallen werden die drei erstgenannten Verfahren erläutert, und beim Eisenguss wird auf Kanonenrohre und Wasser- und Gasrohre eingegangen, ohne die gebräuchlichen Gussstützen zu erwähnen.

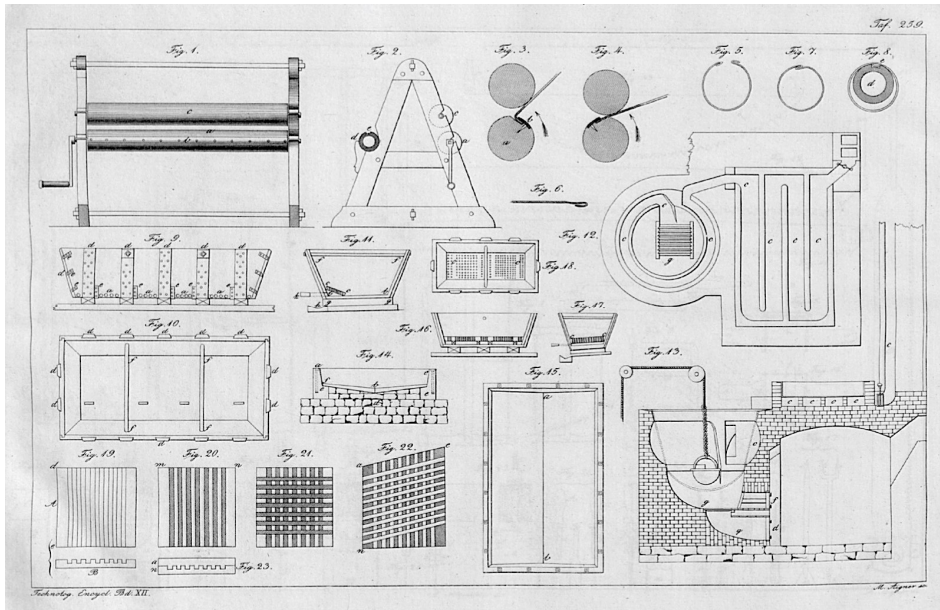


Abb. VII. 1: Fig. 1-7 oben, Biegemaschine für Blechrohre, Johann Jordan, Biedermeierzeit

Erst mit der entwickelten Industrialisierung erscheinen um 1900 Kompendien, die die vielfältigen technischen Anlagen zur Produktion von Metallrohren vollständig erfassen und getrennt nach Gießverfahren und Walzverfahren kategorisieren, wie zum Beispiel Anton Bousse's *Die Fabrikation nahtloser Stahlrohre*⁵. Dipak Dutta gibt in seinem Standardwerk *Stahlrohrkonstruktionen*⁶ in der Einleitung einen kurzen Überblick ausgesuchter Entwicklungslinien hin zum Stahlhohlprofil. Der Leitungsbau steht bei ihm aber bei der Frage nach dem Ursprung gleichberechtigt neben der konstruktiven Verwendung und weicht somit der differenzierteren Darstellung der Evolution und Leistung der Hominden nach Karl Albert Tietze ab (Abb. VII. 3), der seine Betrachtungen in größeren Zusammenhängen kontextualisiert. Obwohl die Metallverarbeitung erst spät einsetzt, waren es wiederum Leitungsröhren, die den tragenden Hohlquerschnitten vorausgingen. Im Folgenden soll daher differenzierter auf die Entwicklungsgeschichten von hohlen Stäben aus Eisenwerkstoffen eingegangen werden.

⁴ Prechtel: *Technologische Encyclopädie*, 1830

⁵ Bousse: *Die Fabrikation nahtloser Stahlrohre*, 1908

⁶ Dutta: *Hohlprofil-Konstruktionen*, 1999

7.2 Der Ursprung als Gefäß

Der umgangssprachliche Begriff *Rohr*, für kreisrunde Hohlprofile im konstruktiven Kontext, zeugt heute noch von seinem Ursprung als formstabiles Gefäß, in Abgrenzung zu den Schläuchen und Pneus.

Auch die *Röhre* wird im Grimm gleichberechtigt neben dem *Rohr* genannt:

„[...] ein durchgreifendes Prinzip, nach welchem der Sprachgebrauch sich für Rohr oder Röhre entschied, ist nicht vorhanden. [sic]“⁷

Rohre für Leitungszwecke und kreisrunde Hohlprofile sind in ihrem Konzept der geometrischen Form identisch, erfüllen aber ursprünglich unterschiedliche Anforderungen hinsichtlich ihrer Funktion – Leiten beziehungsweise Tragen. Diese unterschiedlichen Funktionen lassen sich aber in Teilaspekten des Bauwesens sinnvoll verknüpfen.

Das Tragverhalten für Stäbe kann nach Büttner & Hampe unterschieden werden nach: Druck, Zug, Biegung und Torsion und deren Überlagerungen. Aus dem Performance-Vergleich im Kapitel 8 ist ersichtlich, dass kreisrunde Hohlprofile bei der Beanspruchung auf Druck und Torsion am wirtschaftlichsten abschneiden. Wobei der Druckstab im Bauwesen häufiger zur Anwendung kommt als der reine Torsionsstab.

Einen frühen Sonderfall dieser Synergie aus Leiten und Tragen stellen die hohlen Gussstützen dar, die zur Ableitung von Oberflächenwasser bei Dachtragwerken oder als Teil des Leitungssystems der ersten Gasbeleuchtungen eine Doppelfunktion erfüllten⁸. Im 20. Jahrhundert kamen die wassergefüllten Tragwerke aus Hohlprofilen hinzu, die zum baulichen Brandschutz eine Wasserkühlung als integralen Bestandteil aufweisen⁹.

Die gusseisernen Trogwannen der Aquädukte des englischen Kanalsystems, ab den 1790er Jahren, sind eine Sonderform der sich selbsttragenden Freispiegelleitung mit begrenzter Spannweite. Erst mit der Verfügbarkeit von schweißbaren Stahlrohren waren leistungsfähige Konstruktionen wie Rohrbrücken und Düker (Abb. VII. 2) realisierbar, bei denen das Rohr die Funktionen Leiten und Biegebeanspruchung synergetisch übernimmt.

Anm. zur geometrischen Form:

Das identische Formkonzept wird unterschiedlich normiert, da bei Rohren ein konstanter Innendurchmesser konstituierend ist, wohingegen bei Hohlprofilen es der Außendurchmesser ist, sodass die Wandstärken im ersten Fall nach außen zunehmen und im zweiten Fall nach innen.

Zu 8:

The Philips, Wood and Lee Cotton Twist Mill at Salford (1799-1801)

⁷ online: <http://woerterbuchnetz/grimm/grimm.de/röhre>

⁸ Siehe: Bannister: The First Iron-Framed Buildings, 1950, S. 241

⁹ Siehe: o.A.: Merkblatt 467, 1981

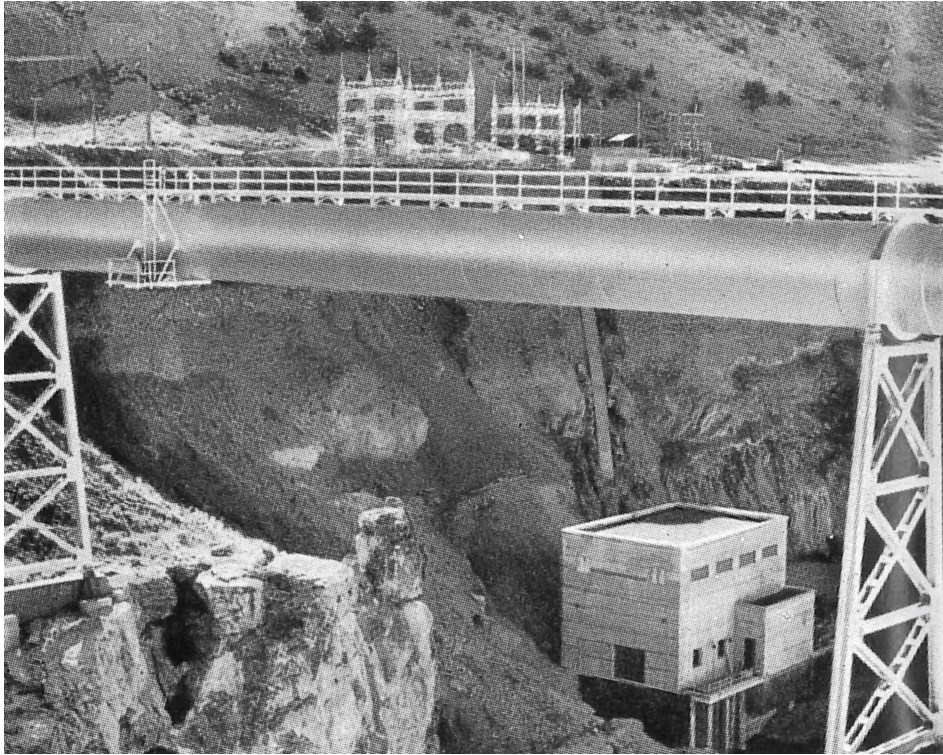


Abb. VII. 2: Selbsttragende Wasserleitung mit 3,12 m Durchmesser

7.3 Das Leitungsrohr für Trinkwasser

Im Folgenden kann gezeigt werden, dass das geometrische Konzept des hohlen Zylinders zuerst als Gefäß im technischen Sinne genutzt wurde, und erst mit der massenhaften Verfügbarkeit von Eisen die statischen Vorteile von kreisrunden Hohlstäben als Konstruktionselemente, zunächst aus Gusseisen und folgend aus Schmiedeeisen, für das Bauwesen erschlossen wurden, die heute unter der Bezeichnung »kreisrunde Hohlprofile« für Stahlwalzprofile genormt sind.

Das Rohr ist keine Erfindung des Menschen. In der Natur findet man Pflanzen und Knochen, die in Röhrenform vorliegen oder sich wie beim Bambus einfach in Rohre auf natürlicher Basis umarbeiten lassen. Sie dienten den frühen Menschen als Waffe/Werkzeug in Form des Blasrohrs und erst deutlich später als primitive Leitung (Abb. VII. 3), die erst mit der Entwicklung des Ackerbaus und der folgenden Sesshaftigkeit eine ortsgebundene Versorgung ermöglichte.

Anm.:
DIN EN 10210-1: Warm-
gefertigte Hohlprofile,
2006 und DIN EN 10219-
1: Kaltgefertigte ge-
schweißte Hohlprofile,
2006

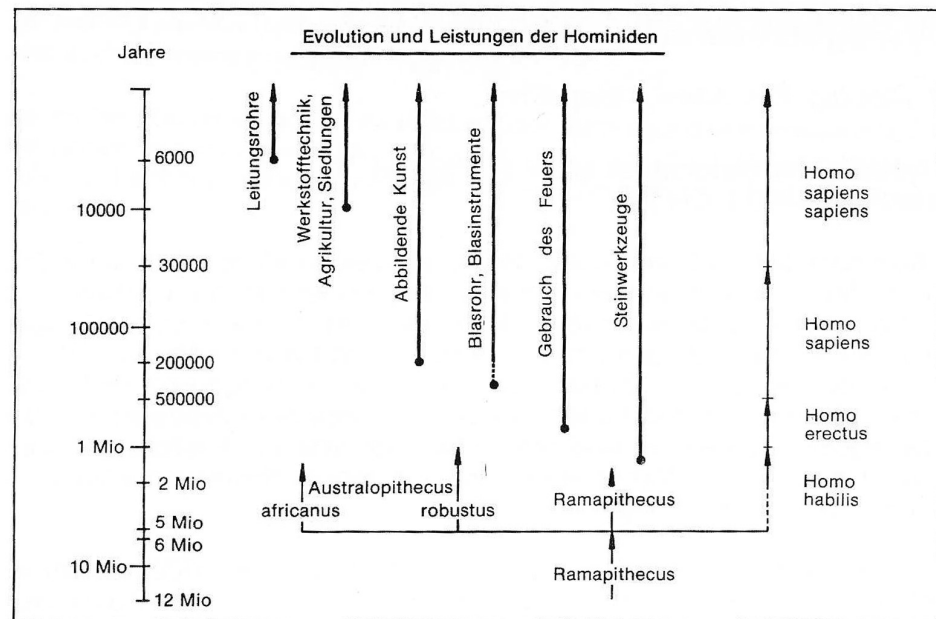


Abb. VII. 3: Evolution und Leistung der Hominiden nach Karl Albert Tietze

Tonröhren waren wohl die erste technische Adaption des Menschen, um komplexere Leitungssysteme für die Trinkwasserversorgung antiker Städte, nachweislich im 4. Jahrtausend v.Chr., realisieren zu können. Dieser Komfort wurde gesellschaftlich hoch geschätzt, sodass es angemessen erschien, auch seltene Metallwerkstoffe parallel zu Stein- und Tonröhren zu verwenden. So ist für den Totentempel des Sahuré in Ägypten die älteste metallische Druckwasserleitung belegt. In der 5. Dynastie (2470-2320 v.Chr.) wurde eine 400 m lange Wasserleitung aus gerolltem Kupferblech mit 47 mm Innendurchmesser im Boden verlegt¹⁰. Im Besonderen die römischen Städte fußten auf einem gesellschaftlichen System, das die kontinuierliche Frischwasserversorgung als zivilisatorische Notwendigkeit betrachtete. Neben den Aquädukten mit ihren Freispiegelleitungen übernahmen im Stadtgebiet genormte Bleirohre als Druckleitungen die Unterverteilung an Haushalte und öffentliche Brunnen¹¹. Obwohl der Metallguss bereits lange beherrscht wurde, sind die römischen Bleirohre aus Bleiblechstreifen von ca. 2,96 m gefertigt. Die Naht konnte unterschiedlich ausgeführt sein und beeinflusste die Querschnittsform maßgeblich (Abb. VII. 4) – von tropfenförmig bis annähernd kreisrund. Somit entsprachen die Querschnitte mit zunehmender Rundheit dem strömungstechnisch günstigsten Kreisquerschnitt.

¹⁰ Siehe: Lamberth: Geschichte von Röhren und Rohrwerkstoffen, 1986, S.141

¹¹ Siehe: Werner: modulorum ratione, 1989, S. 169ff

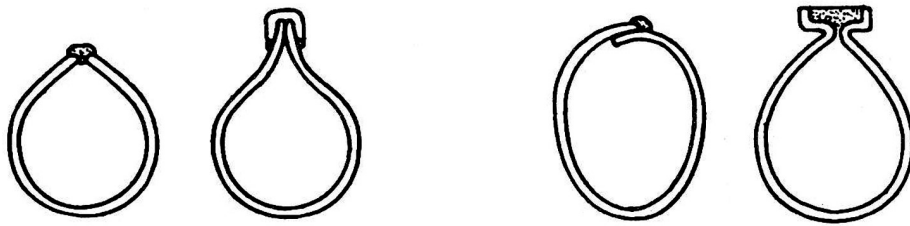


Abb. VII. 4: Ausführungen römischer Bleirohre nach Gockel

Mit dem Zerfall der römischen Zivilisation ab ca. 476 n.Chr. verwahrlosten die Trinkwassersysteme und wurden erst im Mittelalter durch Pipen aus aufgebohrten Baumstämmen auf bescheidenem Niveau lokal neu etabliert, sodass vom Trinkwasserleitungsbau zunächst keine neuen Impulse ausgingen.

Als 1455 das Schloss Dillenburg die erste Wasserleitung in Deutschland aus Gusseisenröhren erhielt, waren diese formal den Muffenröhren aus Ton nachempfunden, und die Technologie des Gießens aus der Stückgießerei des Militärs übernommen worden. Die Röhren waren ca. 1 m lang und hatten eine Nennweite von ca. 3 cm (Abb. VII. 5 oben). Die Steckmuffe diente auch hier nur der besseren Dichtung und konnte planmäßig keine Kräfte übertragen.

Erst mit den Wasserspielen von Versailles unter Ludwig dem XIV. wurde 1686 eine 40 km lange Druckwasserleitung aus Gusseisenröhren gebaut, die als wesentliche Neuerung Flanschen für Schraubverbindungen vorsah¹². Die acht Schrauben im achteckigen Flanschen fixierten Kupfer- und Bleiplatten als Dichtungsscheiben, sodass ein Leitungsdruck von mehreren Bar bei einem Innendurchmesser von 48,5 cm erreicht wurde (Abb. VII. 5 unten). Die achteckige Form des Flanschens ist so ausgebildet, dass der Flanschen ein linienartiges Auflager quer zur Leitungsrichtung ausbildet, sodass jedes Rohrstück als Einfeldträger verstanden werden kann; die Verschraubung dient hier nur der Dichtung – die Aufnahme von Quer-, Längs oder Torsionskräften wird noch nicht planmäßig genutzt. Es ist bemerkenswert, dass die Rohre nur eine Länge von 104 cm aufweisen und der Aufwand am mehr Material für Flanschen, Dichtungsscheiben und Schrauben nicht durch eine größere Schaftlänge reduziert wurde.

Anm.:

Der Strömungswiderstand eines Leitungsrohres wird neben der Rauheit der Innenoberfläche einerseits durch seine Querschnittsform und andererseits durch die Bauform der Richtungsänderung, wie z.B. T-Stücke oder Rohrbögen, maßgeblich bestimmt. Prof. Dr.-Ing. Ingo Rechenberg vom Fachgebiet Bionik und Evolutionstechnik der TU Berlin konnte in den 1970er Jahren den Nachweis führen, dass die Optimierung eines rechtwinkligen Rohrbogens durch Evolutionsalgorithmen, denen durch reine Klothoide oder Korbbögen überlegen ist. Im Experiment wurde ein flexibler Schlauch in Viertelkreisform zur Ausgangsfigur genommen, der mit Hilfe von sechs Klemmen gemäß des gewählten Evolutionsalgorithmus gezielt verformt wurde, bis sich eine optimale Reduktion des Strömungswiderstandes einstellte. Die gefundene Form weicht als leichter s-Bogen deutlich von den bekannten Formen ab. Siehe: Rechenberg: Evolutionsstrategie, 1973, S. 29-33

¹² Tietze: Vom Blasrohr zur Kontinental-Pipeline, 1979, S. 23ff

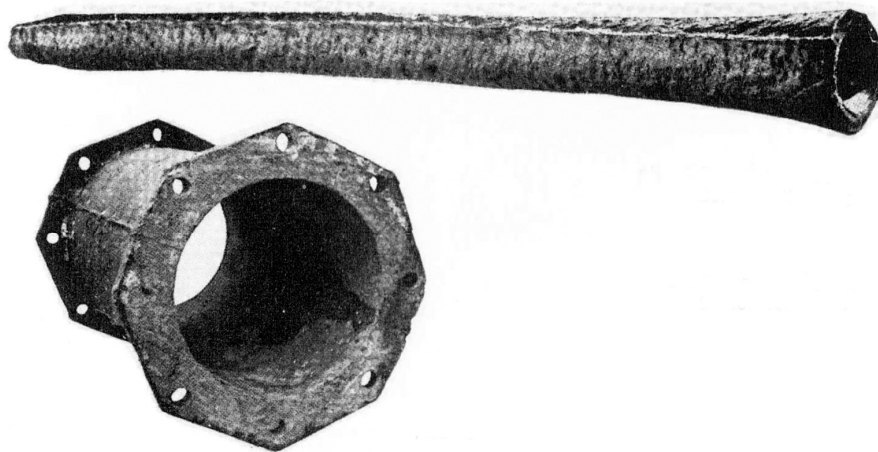


Abb. VII. 5: Oben Muffenrohr Schloss Dillenburg 1455, unten Flanschenrohr Schloss Versailles 1686

7.4 Das Leitungsrohr für Leuchtgas

Mit der Entdeckung des Leuchtgases durch Trockendestillation von Holz oder Kohle stand ab dem 16. Jahrhundert ein neues Leuchtmittel zur Verfügung, das aber erst von William Murdock (1754-1839) ab den 1780er Jahren systematisch erforscht und optimiert wurde. Ähnlich dem Trinkwassersystem, basierte die Gasbeleuchtung auf einem zentralen Produktions- bzw. Speicherort, dem Gaswerk mit seinem Gasometer, analog zum Wasserturm, von dem ein Leitungssystem zu den Verbrauchern führt. Die Anforderungen an die Gasleitungen unterschieden sich aber von denen der Wasserleitungen, was im unterschiedlichen Aggregatzustand des Mediums und der Giftigkeit des Kohlenmonoxid-Bestandteils im Leuchtgas begründet liegt. Gasleitungen aus gewickelter Teerpappe oder Holzpipen waren besonders im Bereich der Verbindungen aufwendig oder nicht dauerhaft dicht, sodass zunächst Gusseisenrohre mit Flanschen diesen Anwendungsbereich dominierten und 1872 von dem DVGW erstmals normiert wurden. William Murdock¹³ hatte aber bereits 1815 mit der Umwidmung von französischen Gewehrläufen aus den napoleonischen Kriegen einen hochwertigen Schmiedestahl in Röhrenform zeitweise zur Verfügung. Durch aufgeschnittene Außengewinde konnten die Rohre mit Schraubmuffen dicht und dauerhaft verbunden werden. An diese historische Episode sollte aber erst das nahtlose Mannesmann-Rohr anknüpfen können.

Anm.:
Der DVGW, Deutsche Verein des Gas u. Wasser-faches e.V. – technisch-wissenschaftliche Verein, wurde 1859 in Frankfurt a. M. gegründet

¹³ Siehe: Marks: Manufacture of Tubes, 1903, S. 3

7.5 Das Leitungsrohr für Dampfmaschinen

Neben den zuvor genannten Entwicklungslinien aus dem Leitungsbau der Infrastrukturprojekte für Gas und Wasser, war es die breitenwirksame Einführung der Dampfmaschinen, die neue Anforderungen an Röhren aus Metallwerkstoffen stellten. Die zur Dampferzeugung notwendigen Rauchrohre wurden mechanisch und chemisch starken Belastungen ausgesetzt. Die heißen und aggressiven Rauchgase wurden dazu durch die Rohre zum Schornstein geleitet und die Wärme über die Außenfläche der Rauchrohre direkt an das unter Druck stehende Kesselwasser abgegeben. Siederohre transportieren den Heißdampf dann zu den Kolbenmaschinen.

Die Brüder Max (1857-1915) und Reinhardt (1856-1922) Mannesmann erkannten das Potential von nahtlosen Stahlrohren verschiedener Durchmesser, Wandstärken und Längen, die sich mit den traditionellen Herstellungsverfahren nicht realisieren ließen.

Die aus dem Schmiedeeisen entwickelten kohlenstoffarmen Stähle seiner Zeit waren diesen Anforderungen grundsätzlich gewachsen und standen in ausreichender Menge zur Verfügung, wenngleich es nicht gelang, daraus qualitative Röhren in Massen zu produzieren.

Cornelius Whitehouse (1795-1883) hatte bereits 1825 das feuergeschweißte Stahlrohr zur Serienreife gebracht, aber die vorteilhaften Eigenschaften wie Duktilität und Festigkeit des Stahls/Schmiedeeisens wurden durch den Schwachpunkt der Schweißnaht konterkariert. Andere Verfahren, wie das Recken oder Tiefziehen lieferten nicht die gewünschten Längen oder Wandstärken. Die Bewältigung des technischen Prozesses und die sich anschließend einstellende weltweite Marktführerschaft sind in der Fachliteratur und den populären Medien schon kurz nach dem Bekanntwerden der Mannesmann-Prozesse umfangreich dokumentiert und kommentiert worden.

Anm.:

Henry Osborn (? – 1827) hatte bereits 1812 ein erstes Patent zur maschinellen Feuer-Verschweißung von Rohren erhalten. (Englisches Patent: Specification No. 3617, 1812) Seine Verbesserungen umfassten aber in erster Linie einen wasserbetriebenen Schmiedehammer mit speziell geformten Gesenken, die ein diskontinuierlichen Prozess erleichterten und noch nicht einen kontinuierlichen Fertigungsprozess wie bei Whitehouse gestatte. Eine Brückentechnologie scheint ein Jahr später mit der Erfindung von gerillten Walzen durch Osborne zu folgen. (Englisches Patent: Specification No. 3740, 1813) Siehe: Marks: Manufacture of Tubes, 1903, S. 2-3

7.6 Assemblierte Behälter, Raumzellen und Gerüste

Schon vor dem nahtlosen Rohr wurde die Herstellung von Schiffsrümpfen, zylindrischen Druckkesseln und Tanklagern mit Durchmessern von mehreren Metern in Niettechnik entwickelt und bis zur Einführung der Schweißtechnik angewendet. Die Schiffsrümpfe und Zylinderschalen wurden aus gebogenen Blechen zusammengesetzt und in den Überlappungszonen der Bleche dauerhaft mit Nietten verbunden, um dem Druck von Flüssigkeiten oder Gasen standzuhalten.

Im Gegensatz dazu sind die schiffbaren Aquädukte in Großbritannien aus verschraubten Trogwannen noch älter zu datieren. Der Dualismus von Gefäß und Tragstruktur der U-Form des Trogs als offenes

Anm.:

1754 wurden erstmals Dampfkesselbleche von 1 m x 0,5 m gewalzt und ersetzten so die händische Schmiedearbeit. Vgl.: Paulinyi: Geschichte des Eisens, 1987

Faltwerk und die Zylinderform der Behälter unter Membranspannung wurde erkannt und für Brückenbauwerke von unbekannter Größe und Ästhetik erstmals in Großbritannien genutzt.

7.6.1 Schiffbare Aquädukte aus Gusseisen

Recht bescheiden nimmt sich eines der frühesten schiffbaren Aquädukte aus, das von Thomas Telford (1757-1834) geplant wurde: Das Longdon-on-Tern Aquädukt wurde bereits 1796 errichtet und überbrückt eine Gesamtstrecke von ca. 57 m bei einer Trogtiefe von 0,91 m und 2,7 m Breite. Es steht auf 3 Sprengwerken, aus gusseisernen Kreuzstützen geformt, die 4 Hauptfelder von 14,5 m bilden. Es ist nach seiner Stilllegung heute als Kulturdenkmal eingetragen. Der ehemals wasserführende Trog wird von einem Treidelpfadweg parallel dazu ergänzt. Der Haupttrog ist aus Gusseisenplatten mit nach außen orientierten Flanschen zusammengeschraubt. Die Wangen werden aus 7 trapezförmigen Platten geformt, der Trogboden besteht aus 8 rechtwinkligen Platten mit den Stößen quer zur Fahrtrichtung.

Das Aquädukt von Briare bei Châtillon-sur-Loire, erbaut 1896, mit einer Gesamtlänge von 662 m, war bis 2003 das längste seiner Art. Der Trog mit beidseitigem Treidelpfad wurde aber hier schon aus genieteten Stahlblechen mit außenliegender Trägerversteifung geformt.¹⁴

7.6.2 Röhrenbrücken aus Schmiedeeisen

Ernst Werner hat den Bezug der frühen Brückenbauingenieure im vereinigten Königreich zum Schiff- und Behälterbau in seiner Schrift *Britannia- und Conway-Röhrenbrücke* überzeugend dargestellt¹⁵. Culmann¹⁶ (1821-1881) berichtete danach in der Allgemeinen Bauzeitung 1852 von Erkenntnissen aus dem Schiffsbau, die die Formgebung von Viadukten stark beeinflussen sollte:¹⁷

„Um diese Zeit wurde bei einem mißglückten vom Stapel lauf lassen eines eiseren Dampfbootes dieses in eine Lage gebracht, wo es bloß an beiden Enden auflag und auf 160' lichte Weite frei in der Luft schwebte, ohne sich in der Mitte auch nur im Geringsten einzuschlagen. Hierdurch und durch mehrere andere Fälle, wo schmiedeeiserne Röhren sich außerordentlich steif und stark gezeigt hatten, wurde Stephenson dahin gebracht, die Röhre und nicht die Kette als den haupttragenden Theil zu betrachten.“¹⁸

Anm.:

Telfords Gusseisen-Aquädukt am Shresbury Canal bei Shropshire ist nicht nur älter als die Coolbrookdale bridge (1777-1779), es ist aus konstruktiver Sicht auch innovativer, da hier nicht eine bekannte Brückenform mit Analogien zum Holzbau umgesetzt wurde. Ihre Spannweite liegt deutlich über dem des zeitgleichen Holmes Aquädukt von Benjamin Outram am Derby Canal, das einen Monat zuvor eröffnet wurde.

¹⁴ Siehe: online: www.engineering-timelines.com □ Aquädukt von Briare

¹⁵ Siehe: Werner: Röhrenbrücke, 1969

¹⁶ Culmann: Eiserne Brücken, 1852, S. 193-222

¹⁷ Siehe: Werner: Röhrenbrücke, 1969, S. 20ff

¹⁸ Culmann: Eiserne Brücken, 1852, S. 1755

Durchschnitt der Versuchsröhre durch die Mitte.

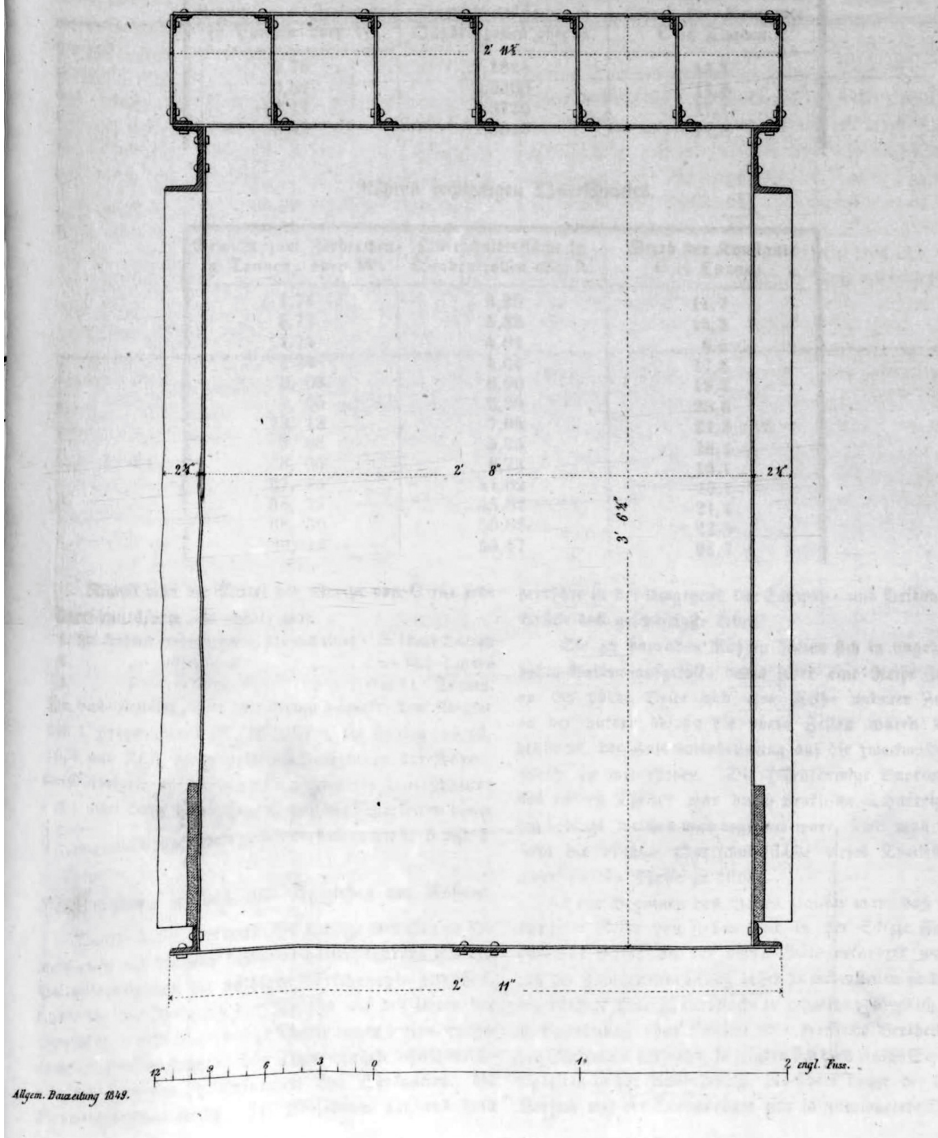


Abb. VII. 6: Versuchsröhre der Conway- und Britannia-Röhrenbrücke von Stephenson, 1840er Jahre

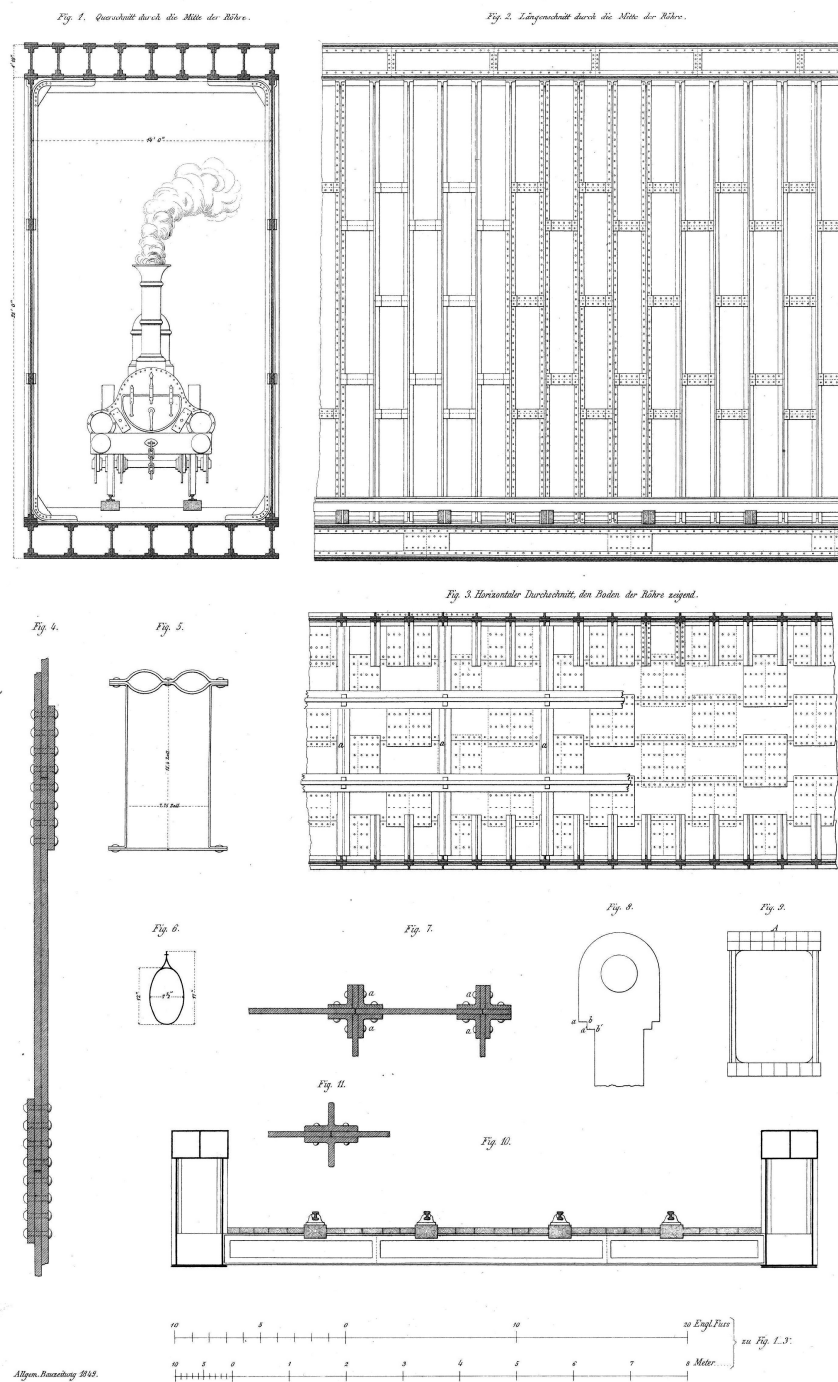


Abb. VII. 7: Fig. 5 Versuchsröhre mit elliptischem Querschnitt im Obergurt der Conway- und Britannia-Röhrenbrücke von Stephenson, 1840er Jahre

Robert Stephenson (1781-1848) sah sich von dieser Demonstration der Steifigkeit von Hohlkörpern aus schmiedeeisernen Blechen seinerzeit in der Annahme bestätigt, dass es wirtschaftlich erschien, eine Röhrenbrücke für die Überbrückung des Menai Strait und des Conwys für durchfahrende Züge zu planen. An beiden Passagen bestanden bereits Kettenhängebrücken von Telford, die aber für die schwere Wanderlast

der fahrenden Züge nicht über die notwendige Steifigkeit in horizontaler und vertikaler Richtung quer zur Fahrtrichtung verfügten.

Die Röhre mit rechteckigem Querschnitt (Abb. VII. 7 oben links) entwickelte sich aus den offenen Trogwannen aus Gusseisen der schiffbaren Aquädukte und den Beobachtungen aus dem Steifigkeitsverhalten genieteter Schiffskörper, die mit der *Vulcan*¹⁹ von 1819 ihren Entwicklungsausgang nahmen und in der *Great Eastern*, mit 211 m Länge, von Brunel ihren Höhepunkt im 19. Jahrhundert fand.

Die Steifigkeit des Faltwerkes der Tröge wurde einerseits durch das Gusseisen und in zweiter Hinsicht durch die konstruktiven Flanschen bis zu einer gewissen Größe im Verhältnis zu Spannweite und Querschnittsform gewährleistet. Die geplanten Spannweiten von 400 bzw. 460 Fuß beim Conwy und der Menai Strait überstiegen bei Weitem die Belastungsgrenzen von sprödem Gusseisen. Das Schmiedeeisen konnte sowohl für Zug als auch Druck bessere Kennwerte aufweisen und sein E-Modul wurde mit dem doppelten des Gusseisens angenommen. Der Einfluss der Höhe der Wangen zum Erreichen der notwendigen Steifigkeit war bekannt, ebenso die empirischen Kenntnisse über das Versagen durch Beulen ab einem bestimmten Verhältnis von Wangenstärke und Höhe. Das Beulen konnte aber durch die Fixierung des oberen freien Wangenrandes stark reduziert werden, sodass es naheliegend erschien, den offenen Trog, jetzt aus Schmiedeeisen, mit einem Deckel kraftschlüssig zu verschließen – wie es bei Schiffsrümpfen das Deck tat. Diese geschlossene Form versprach zudem den Vorteil der wetterunabhängigen Passage bei starken Stürmen. Obwohl der rechteckige Querschnitt auch dem Lichtraumprofil des Zuges entsprach, wurde die Eignung von kreisrunden Röhren aus vernieteten Blechen im Modellmaßstab als erstes untersucht; es folgten elliptische und später Kombinationen aus einer rechteckigen Hauptzelle mit Nebenzellen im Obergurt – elliptischen (Abb. VII. 7 Mitte links) und schließlich rechteckigen (Abb. VII. 6). Da die Röhren zunächst als einfache Einfeldträger untersucht wurden, waren die Beobachtungen richtig einzuordnen, als bei Belastung der rechteckigen Monozellen der Obergurt durch Beulen versagte, bevor die untere Zugzone aufriss. Die Anordnung beulsteifer Zellen im Obergurt war somit konsequent²⁰.

Ein weiterer Vorteil der Konstruktion mit schmiedeeisernen Blechen bestand darin, dass die Verbindungen mit Nieten, im Gegensatz zu teuren Schrauben bei Gusseisen, hergestellt werden konnten.

Anm.:

Der Sonderforschungsbe-
reich 315 *Erhalten historisch
bedeutsamer Bauwerke* hat die
Qualität von historischen
Eisenwerkstoffen unter-
sucht und gibt für Graugusslegierungen eine
Spanne von $R_D \approx 320 - 780 \frac{N}{mm^2}$
für die Druckfestigkeit und
von $R_Z \approx 80 - 180 \frac{N}{mm^2}$ für die
Zugfestigkeit an; histori-
scher Stahl: $300 - 360 \frac{N}{mm^2}$;
siehe: Käßlein/Wiel-
gosch-Frey: *Historische Ei-
sen- und Stahlkonstruktionen*, 2001, S.13ff; vgl. auch:
o.A.: *Denkmäler aus Eisen
und Stahl*, 2014, S. 15ff u.
Helmerich: *Alte Stähle*,
2005, S. 11ff

¹⁹ Siehe: Smith: *History of Marine Engineering*, 1937, S. 98

²⁰ Siehe: Fairbairn: *Construction of Tubular Bridges*, 1849

Zur Ausführung bei der Britannia-Brücke (1846-1850) kamen rechteckige Röhren, ähnlich der Conway Brücke (1846-1848), mit beulsteifen Zellen sowohl am Ober- als auch am Untergurt; die Seitenwände wurden durch T-Profile an den Stoßfugen versteift (Abb. VII. 7 oben). Die zusätzlichen Zellen am Untergurt waren in der Zugzone notwendig geworden, da der Zug eine Wanderlast darstellt, die eine ausreichende Steifigkeit des Gleisstranges erforderte. Das Profil der Röhren²¹ in der Seitenansicht war im Obergurt leicht parabelförmig gehalten, mit einem Stichmaß von ca. 3 Fuß bei beiden Brückenbauwerken.

Isambard Kingdom Brunel (1809-1859) profitierte von den neuen Erkenntnissen über das Tragverhalten von *tubular girders* aus Schmiedeeisen, die bereits 1849 in *The Application of Iron to Railway Structures*²² ihren Eingang fanden, als er 1849 mit der Planung einer zweigleisigen Eisenbahnbrücke über den Fluss Wye bei Chepstow beauftragt wurde (Abb. VII. 8). Er interpretierte aber die Ergebnisse der von Fairbairn und Stephenson gebauten Brücken neu und bewertete die Leistungsfähigkeit der kreisrunden Röhren aus Schmiedeeisen als noch nicht vollständig ausgeschöpft.

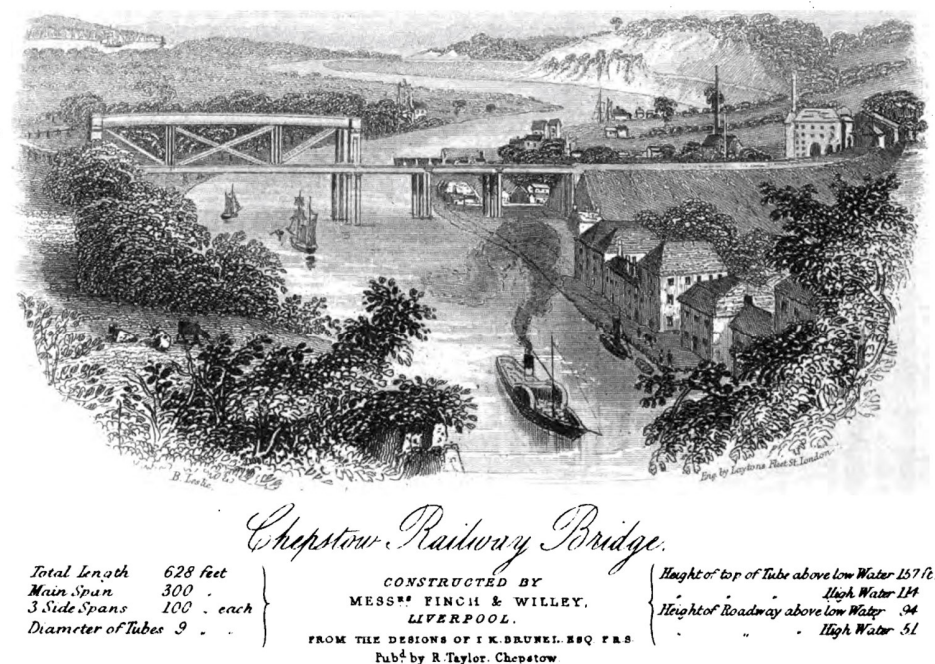


Abb. VII. 8: Railway Tubular Suspension Bridge von Isambard Kingdom Brunel, 1852

Sein Ansatz bestand darin, eine horizontale kreisrunde Röhre so steif auszubilden, dass eine Fahrbahntafel von ihr abgehängt werden kann, ohne die Nachteile der adaptiven Form der Hängebrücke mit flexiblen

²¹ Siehe: o.A.: Die Röhrenbrücke in England, 1849, Bl. 273-280

²² Siehe: o.A.: The Application of Iron to Railway Structures, 1849

Hängeseilen in Kauf nehmen zu müssen. Die Situation vor Ort erforderte eine lichte Spannweite von ca. 90 m, bei einer schiffbaren lichten Höhe von 50 Fuß bei Springtide; die drei weiteren Vorbrückenjoche konnten konventionell ausgeführt werden. Brunels Design für die Hauptöffnung sah eine Röhre als Biegeträger pro Gleisstrang vor. Von dieser wurde die steife Fahrbahntafel mit vier schrägen und zwei senkrechten Zugbändern je Seite abgehängt, sodass eine Bewegung der Fahrbahntafel in Längs- und Querrichtung behindert wurde. Die Trägerröhre (Abb. VII. 9) selbst war 90,4 m lang bei einem Durchmesser von 2,7 m und wurde alle 9 m im Innern durch ein kreisrundes *Diaphragma* mit konzentrischer Öffnung gegen Beulen gesichert. Die gebogenen Platten aus Schmiedeeisen wurden überlappend mit Nieten verbunden und Winkelprofile im Innern dienten dem Anschluss der Diaphragmen. Die Röhre war als statisch bestimmter Balken gelagert und wies eine sichtbare Überhöhung in der Mitte auf.



Abb. VII. 9: Erhaltener Querschnitt der Tragröhre mit Diaphragma von Isambard Kingdom Brunel, 1852

Brunels Ansatz war insoweit bemerkenswert, als dass er den Nachweis führen konnte, dass seine Anwendung von *tubular girders* deutlich materialsparender war als Fairbairns Ansatz. Bei der Brücke von Chepstow

kamen zum ersten Mal großformatige, röhrenförmige Tragstrukturelemente zum Einsatz, die den Hohlraum gezielt zur Stabilisierung gegen lokales Beulen nutzen, ohne auf ein Lichtraumprofil Rücksicht nehmen zu müssen. Zukünftig war es nun möglich, den tragenden Querschnitt graduert auszuformen, ohne die Struktur der Zylinderschale nach außen sichtbar zu verändern.

Brunel variierte seinen konstruktiven Ansatz der Verwendung von *tubular girders* bei der *Royal Albert Bridge* über den Fluss Tamar bei Saltash, errichtet von 1854-1859. Zwei linsenförmige Träger überspannen die zwei Hauptöffnungen der Brücke mit jeweils 138,7 m für eine eingleisige Eisenbahnstrecke. (Abb. VII. 10)

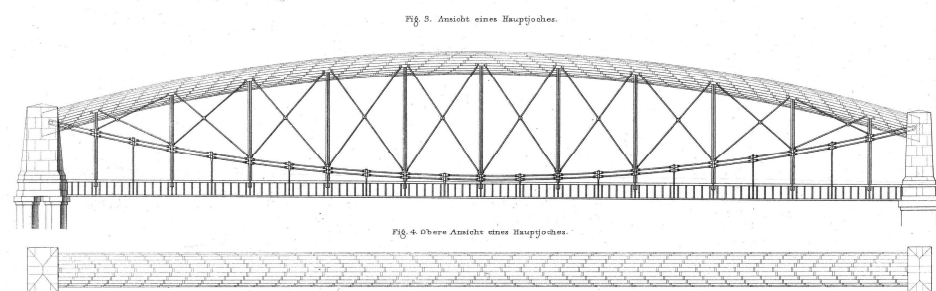


Abb. VII. 10: Längsansicht der Hauptöffnung der Royal Albert Bridge von Isambard Kingdom Brunel, 1859

In der Allgemeinen Bauzeitung wird diese *Bow-strings-Konstruktion* wie folgend beschrieben:

„Die großen Oeffnungen der Brücke bestehen aus einer großen Röhre mit elliptischem Querschnitt, deren Achsen resp. 5m10 und 3m66 lang sind; die Stärke der Bleche am Scheitel beträgt 0m013, an den Seiten 0m026. Der Pfeil des Bogens ist 9m15. Die Brückenbahn ist an diesen Bogen vermittelt senkrechter Träger und Andreaskreuze, welche an jeder Seite der Röhre mit starken Bolzen befestigt sind, angehängt. Die Röhre ist an jedem Portikus durch einen ungeheuren Bolzen tüchtig befestigt, welcher allein die Hälfte des Gewichtes vom ganzen Joche zu tragen hat. Der horizontale Druck auf die Stützpunkte wird durch eine große Kette von geschmiedetem Eisen aufgewogen, deren Glieder 5m95 lang und untereinander durch starke Bolzen verbunden sind. Die beiden Balken, woraus die beiden Mitteljoch bestehen, haben eine Höhe von 2m44 und sind an ihrem obern Theile abgerundet. Dieser Brückentheil über dem Meere hat einen Pfeil von 1m22, welcher zum Ansehen der Leichtigkeit bedeutend beiträgt.“²³

²³ o.A.: Die Brücke von Saltash, 1857, S. 190

Fig. 6.
Querschnitt der Röhre von dem Hauptjochen.

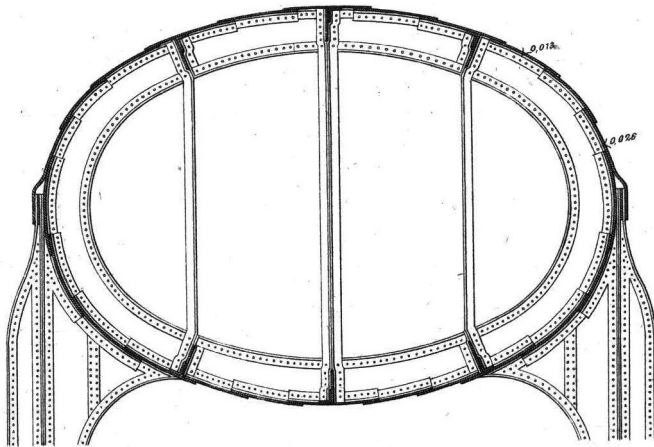


Abb. VII. 11: Querschnitt der Tragröhre der Royal Albert Bridge von Isambard Kingdom Brunel, 1859

Das Prinzip des linsenförmigen Trägers ist bereits 1823 bei der Gaunless-Bridge (Abb. VII. 12), Bezirk Durham, von George (1781-1848) und Robert (1803-1859) Stephenson angewendet worden. Bei den nur 3,78 m langen Trägern, werden die Ober- und Untergurte aus schmiedeeisernen Rohren von 6 cm Durchmesser geformt. Vertikale Streben aus Gusseisen spreizen die Gurte und tragen den Überbau aus Holz. Die vier Felder werden von 5 Paaren ausgekreuzter, schräggestellter Gussstützen getragen.



Abb. VII. 12: Gaunless-Bridge von George Stephenson und Sohn Robert, 1824

Die Aufteilung der inneren Kräfte auf einen oberen Druckbogen bzw. untere Kettenlinie ist das erste Mal bei Faustus Verantius²⁴ 1617 anhand

²⁴ Siehe: Faustus: MACHINÆ NOVÆ, 1617, Tf. 31 Pons Ligneus

einer unausgeführten Holzkonstruktion dokumentiert. Wie etwas später noch bei Georg Friedrich Laves²⁵ (1788-1864), ist diese Methode schon intuitiv richtig, aber erst Friedrich August von Pauli (1802-1883) sollte mit Hilfe der grafischen Statik die Formfindung auf eine ingenieurmäßige Grundlage stellen.

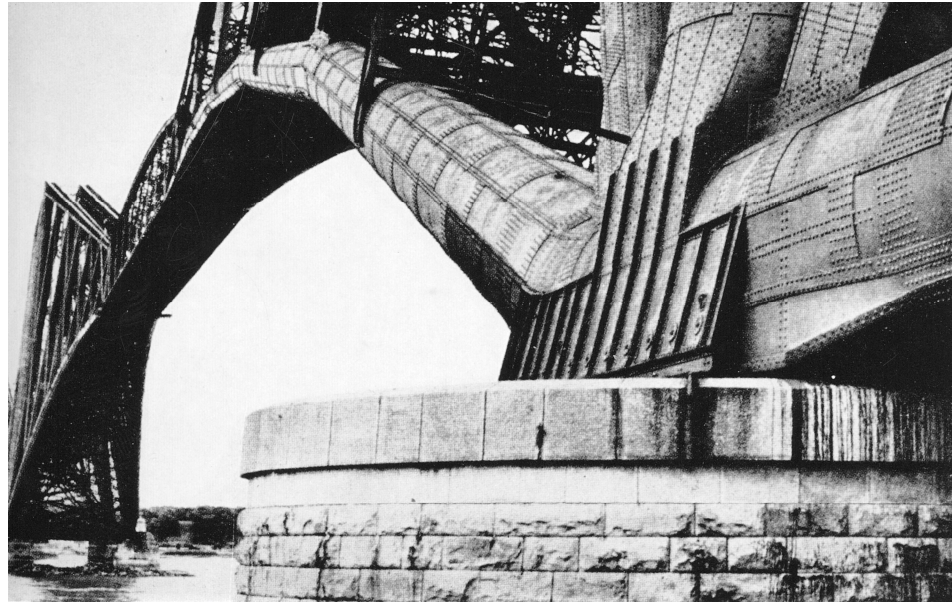


Abb. VII. 13: Assemblede Rohe aus genieteten Blechen, Firth of Forth Bridge, 1882-90

Die zweigleisige Eisenbahnbrücke (Abb. VII. 13) über den Firth of Forth bei Queensferry von John Fowler (1817-1898) und Benjamin Baker (1840-1907) ist ihrer Struktur nach, im Bereich der schiffbaren Hauptöffnungen, eine Auslegerbrücke in Fachwerkbauweise. Errichtet von 1882-1890, galt sie für Dezennien als Entwicklungssprung im Brückenbau. Sie unterscheidet sich in ihrer Form deutlich von denen anderer Brückenbauten und steigert diese in nie zuvor erreichte Dimensionen. Drei rautenförmige Gitterkonstruktionen von je 109,86 m Höhe und 493,64 m maximaler Breite, bilden die *Cantilevers*, die über gelenkig gelagerte, 106,68 m lange, Halbparabelträger miteinander verbunden sind – die Konstruktion folgt dem Prinzip des Gerberträgers. Die *Cantilevers* sind in ihrer Binnenstruktur differenziert ausgebildet, wenn auch hier die Dimensionen für untergeordnete Streben gewaltig erscheinen. Vier Rohrstützen von 3,66 m Durchmesser und 109,86 m Höhe bilden mit ihren Auskreuzungen aus Rohren und einer horizontalen Strebe aus Fachwerk das Gerüst für den vertikalen Lastabtrag. Die auskragenden Seitenarme, mit bis zu 210 m Länge, werden aus einem Untergurt in Rohrbauweise und einen Obergurt in Fachwerkbauweise geformt. Die sich kreuzenden Diagonalen sind in Druckbereichen als Rohre und in

²⁵ Romberg: Zimmerwerks-Baukunst, 1847, S. 271

den Zugbereichen als Fachwerk ausgeführt. Von den Kreuzungspunkten führen zusätzliche Rohre zum Untergurt; die eigentliche Bahntrasse wird unterhalb dieser Kreuzungspunkte auf einem eigenständigen, zweischenkligen Fachwerkträger horizontal geführt.

Fowler und Baker konnten ihre Konstruktion in den 1880er Jahren bereits mit dem leistungsfähigen Siemens-Martin-Stahl realisieren und waren durch die Erkenntnisse August Wöhlers (1819-1914) für eine differenzierte Bewertung von ruhenden und wechselnden Belastungen sensibilisiert. Die Entwicklungslinie für zusammengesetzte, röhrenförmige Tragstrukturelemente, bei Isambard Kingdom Brunel beginnend, wird hier effektiv weiterentwickelt (Abb. VII. 14).

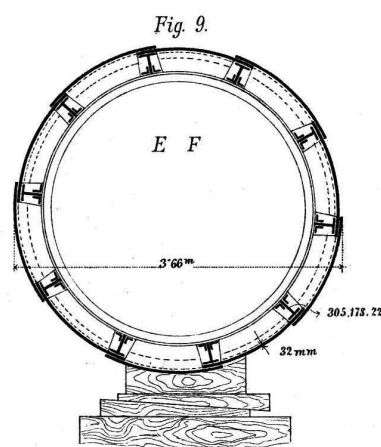


Abb. VII. 14: Querschnitt der Tragröhre mit Verstärkungsrippen und Diaphragma, der Firth of Forth Bridge, 1890

Die vorteilhaften Prinzipien der Röhrenform, mit ihren Möglichkeiten der inneren Versteifung (Abb. VII. 14 u. Abb. VII. 15), werden bei dieser Konstruktion für knickgefährdete Stäbe konsequent angewendet und tragen zur eigenen Ästhetik bei, die sich im Kleinen fortsetzt: Die begrenzten Lieferformen des Stahls, Bleche und Winkelprofile folgten der Logik des Nietens und wurden am Bauplatz mit hydraulischen Maschinen in Form gebracht – schuppenartige Überlappungen werden von Nietflächen bzw. Reihen strukturiert (Abb. VII. 13) – die Faktur wird zum Ornament.

Fig. 3.
Auflagerung der Eisenconstruction

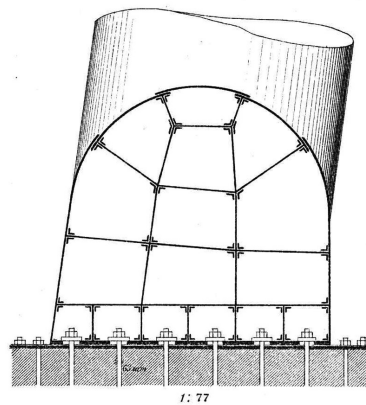


Abb. VII. 15: Auflagerdetail der Firth of Forth Bridge mit innerer Versteifung, 1890

7.6.3 Frühe Rohrkonstruktionen bei ortsfesten Seezeichen

Die beschriebene Entwicklung von Großröhren im Eisenbahnbrückenbau als Biegeträger und seltener auch als Druckstäbe, wie im Fall der Firth of Forth Brücke, wurde durch ein anderes Infrastrukturprojekt der beginnenden Industrialisierung mitgetragen. Früher noch als das Eisenbahnnetz Großbritanniens, waren es die weltweiten Handelsbeziehungen, die eine Sicherung der Seewege durch ortsfeste Seezeichen erforderte. Der gewachsene Bedarf an Leuchttürmen und Baken stellte ein interessantes Betätigungsfeld für den frühen britischen Eisenbau dar, da der hohe Vorfabrikationsgrad von Konstruktionselementen aus Gusseisen und später Schmiedeeisen sich für den Transport und eine schnelle Montage von Turmbauwerken eignete und strukturell den statischen Anforderungen an exponierten Standorten zu Lande oder zu See gewachsen schien.

Miles Lewis gibt in seinem Artikel *Iron Lighthouses*²⁶ einen Überblick zu den historisch ersten Planungen bis zur Typenbauweise von Leuchttürmen und Baken aus Eisenwerkstoffen. Nach Lewis²⁷ beginnt die Vorgeschichte eiserner Leuchttürme mit der Empfehlung zum Bau eines Leuchtturmes auf dem Felsen Bell Rock, östlich von Schottland 1799, dessen Konstruktion aber nicht näher benannt wurde, da es als Projekt frühzeitig abgelehnt wurde.

²⁶ Lewis: *Iron Lighthouses*, 2012

²⁷ Siehe: Lewis: *Iron Lighthouses*, 2012, S. 24

Von Robert Stevenson²⁸ (1772-1850) ist dagegen ein Entwurf von 1810 für die selbe Stelle überliefert. Der Entwurf sah eine Pyramide aus 8 Gusseisenstützen mit Aussteifungselementen vor.

Erst 1821 wurde mit der Fertigstellung der Carr Rock Beacon von Stevenson ein erstes Seezeichen aus Gussrohren nachweisbar. Diese Gerüstbauweise aus Gussrohren ohne zentralen Schaft auf polygonalem Grundriss wurde in der Folge an anderen Orten in Schottland kopiert, wie z.B. am Standort Covesea (Abb. VII. 16).

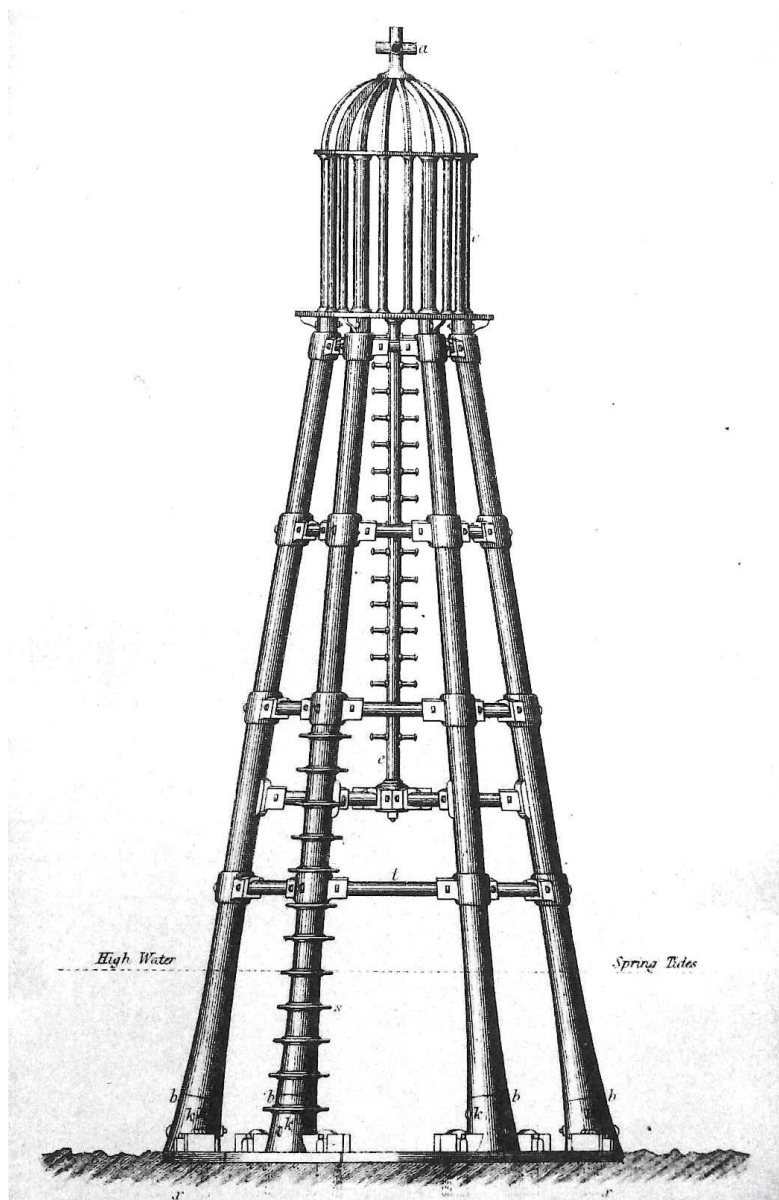


Abb. VII. 16: Covesea Beacon von Alan Stevenson (1807-1865), ca. 1820er Jahre

Anm.:

Strukturell vergleicht Lewis die Gerüstbauweise mit den Fördergerüsten des Bergbaus – er gibt aber keinen Hinweis, ob es sich bei den Fördergerüsten gleicher Zeitstellung ebenfalls um Röhrenkonstruktionen handelte. Siehe: Lewis: Iron Lighthouses, 2012, S. 27

Eine andere technische Anwendung von Großrohren aus Eisenwerkstoffen wären Fabrikschornsteine. Hierzu konnten aber leider keine historischen Quellen gefunden werden.

Die Deutsche Bauzeitung berichtet 1885 im Vorfeld zu Planung eines 300 m hohen Aussichtsturmes für die Pariser Weltausstellung 1889, das neben der Stahlkelettbauweise Eiffels und der Massivbauweise Bourdais' eine dritte Bauweise vorgeschlagen wurde:

„Capitain de Serres will den Thurm [sic] in Form eines Mastes aus Blech konstruieren [sic], der ähnlich wie Schiffsmaste durch Drahttaue gehalten werden soll; dieser werden 4 sein, die in den Höhen von 100, 150, 200, 250 und 300 m an Ringen angreifen und deren untere Angriffspunkten in einem Kreise von 200 m Durchmesser liegen. Der untere Durchmesser des Mastes soll nur 12 m, der obere 3 m sein. Nach unserer Ansicht ist von den 3 vorliegenden Projekten nur das Eiffel'sche, als Eisengitter-Konstruktion entworfene, im Ernst diskutierbar [sic], bei den anderen scheinen uns wenn auch nicht statische, so doch praktische Unmöglichkeiten wenigstens vorhanden zu sein.“

o.A.: Projekte zu Aussichtsthürmen, 1885, S. 580

²⁸ Siehe: Lewis: Iron Lighthouses, 2012, S. 24

Nach Lewis können die frühen Konstruktionen für Leuchttürme und Baken aus Eisenwerkstoffen bautechnikgeschichtlich nach der Struktur ihres Tragwerkes grob in zwei Kategorien eingeordnet werden:

- Gerüststrukturen aus Gussröhren üblicher Durchmesser und Längen, wie bei der Covesea Beacon (Abb. VII. 16). Diese Bauweise ermöglichte räumliche Strukturen auf bevorzugt hexa- oder oktogonalem Grundriss und die Gründung konnte in sandigem Boden/Meeresgrund mit Hilfe von patentierten Schraubpfahlgründungen an jedem Gerüstbein separat erfolgen. Die Laterne, das Wärterhäuschen oder einfache Plattformen konnten über den Höchststand der Wellen errichtet werden, ohne dem Seegang eine große Angriffsfläche zu bieten.
- Segmentierte Großrohre aus gekrümmten Guss- oder Schmiedeeisenelementen. Diese Bauweise entsprach in ihrer Großform den Sehgewohnheiten der gemauerten klassischen Leuchttürme mit ihrer leicht verjüngenden Kontur eines Kegelstumpfes. Die Großrohre konnte integral die Wendeltreppe und das zentrale Fallrohr für das Antriebsgewicht des Laternenmechanismus aufnehmen und im Fußbereich so mit Beton beschwert werden, dass die Standsicherheit auch gegenüber Wellen und Sturm gegeben war.

Eine dritte Kategorie bilden die Hybride mit einem segmentierten Großrohr im Zentrum auf einer Plattform einer polygonalen Gerüstkonstruktion aus Gussrohren in der Peripherie, die eine Schraubpfahlgründung im Off-Shore-Bereich ermöglichte. Der Leuchtturm bei Sands Key (Abb. VII. 17) von 1853 ist ein früher Vertreter dieser hybriden Bauweise.

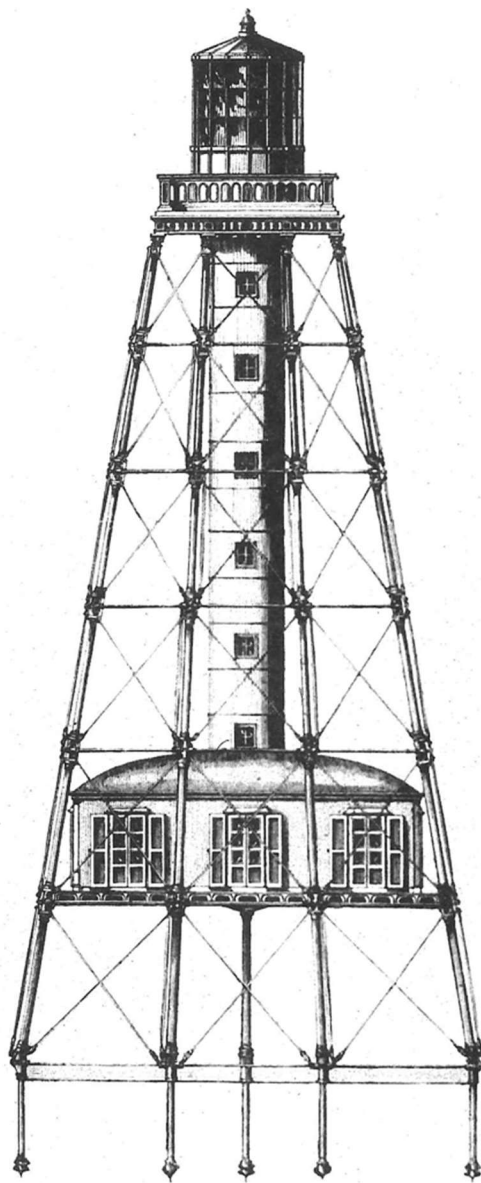


Abb. VII. 17: Leuchtturm bei Sand Key, Süd Florida, von I.W.P. Lewis und John Walker 1851-1853

Lewis zitiert hier die *Times* und den *Builder* von 1851, die eine detaillierte konstruktive Beschreibung geben. Hervorzuheben ist die frühe Verwendung von Wellblech, hier mit einer Wandstärke von 10 mm, für das der Vater Richard Walker ein Patent hielt.²⁹ Die Wände des Wärterhäuschens und des zentralen Großrohres bestanden danach aus einer zweischaligen Wellblechkonstruktion mit 130 mm Luftspalt dazwischen. Das 2,1 m im Querschnitt messende Großrohr ist aus doppelwandigen, halbkreisförmigen Segmenten von 1,8 m Höhe zusammengesetzt, die Orientierung der Welle kann man aus der Abb. VII. 17 als Kannelierung schemenhaft erkennen. Die Verbindung erfolgte durch

Anm.:

Lewis' Quellen: *Times*, xx, 713 (13 Januar 1851), S. 5; *Builder*, ix, 419 (Februar 1851), S. 102. This must be the lighthouse built 'on the Florida sands' in 1851 which Guedes attributes to Richard Walker. Pedro Guedes, *The Macmillan Encyclopedia of Architecture and Technological Change* (London 1979), S. 272

Siehe: Lewis: *Iron Lighthouses*, 2012, S. 59

²⁹ Siehe: Lewis: *Iron Lighthouses*, 2012, S. 31

Winkelprofile auf der Innenseite. Mit seinen 27,3 m Höhe gehörte er zum Mittelfeld und wurde deutlich von ähnlichen zeitgenössischen Konstruktionen mit glattem Großrohr um ca. 10 m überragt.

Es wird leider von Lewis keine Aussage zu den konstruktiven Absichten über die Verwendung des Wellblechs gemacht – dass die Strukturierung und die Zweischaligkeit eine bewusste Maßnahme gegen das Beulen dieses Großrohres hätten sein können, wäre mehr als Spekulation. Bezieht man die mäßige Höhe auf den Quermesser und seine doppelte Wandstärke, erscheint eine Beulgefahr recht gering; da auch die innere Struktur aus Wendeltreppe und Zwischenpodeste als aussteifend angenommen werden können. Das strukturelle Potential wurde scheinbar nicht erkannt und somit in keiner Weise ausgeschöpft. Ein Wellblech lässt sich zudem nicht mit Hilfe einer gebräuchlichen Drei-Walzen-Biegemaschine krümmen, wie es mit flachen Blechen üblich war. Dieser handwerkliche Mehraufwand ohne Mehrwert in der Effizienz der erzielten Form wirft Fragen auf.

Die Verbindungstechniken entsprechen in der Regel den zeitgenössischen technischen Standards, wobei die Vorfabrikation die Verschraubung dem Nieten vorzog. Neben angegossenen Flanschen beim Gusseisen wurden Winkelprofile für schmiedeeiserne Platten verwendet. Eine Variation stellte eine französische Bauart dar: Hier wurde zuerst ein Tragerrüst aus Winkelstählen gebaut, das anschließend mit Blechen verkleidet wurde.³⁰

Die Großröhren aus Gusseisenplatten mit bis zu 40 mm Wandstärke konnten sich bei den Leuchtturmkonstruktionen länger halten als im Viaduktbau. Bei den Trägerröhren der Brücken kamen sie erst gar nicht zur Anwendung. War bei den Trägerröhren die Biegebeanspruchung nur durch das zugfeste Schmiedeeisen beherrschbar, so ist das Großrohr der Leuchttürme dagegen vorwiegend auf Druck beansprucht. Das Standsicherheitskonzept beruhte auf einem hohen Eigengewicht, das eine mögliche Biegebeanspruchung aus seitlichen Kräften einfach *überdrückte*. In dieser Konsequenz wurden die Großrohre zusätzlich zum Schwergewichtsfundament im Innern häufig ausgemauert. Nach Lewis wurde ein norwegisches Modell von 1854 aus Gusseisen mit einem Nut-Feder-System³¹ anstatt der Schraubflanschen gebaut, das sinnvoll eine horizontale Verschiebung behindern würde und in Längsrichtung allein aus den Druckkräften aus dem Eigengewicht verlässlich wäre.

Anm.:

Das Ausmauern erfolgte nicht nur, um das Eigengewicht zu erhöhen; es konnte so auch das bauphysikalische Verhalten günstig beeinflusst werden. Das Mauerwerk reagierte als thermische Masse träge auf Hitze und Kälte und erleichterte den Aufenthalt des Personals im Turm.

³⁰ Siehe: Lewis: Iron Lighthouses, 2012, S. 56

³¹ Siehe: Lewis: Iron Lighthouses, 2012, S. 48

7.6.4 Das Quadrant-Eisen als Brückentechnologie

Der wachsenden Kapazität an Roheisen bzw. dessen Preisverfall (Abb. VII. 18) stand noch bis zum Ende des 20. Jahrhunderts die limitierte Prozesskapazität in den Stahl- und Walzwerken gegenüber, die sich zwar im Angebot der Walzprodukte diversifizierte (Abb. VII. 19), aber letztlich immer noch Beschränkungen der Größenabmessungen unterlagen.

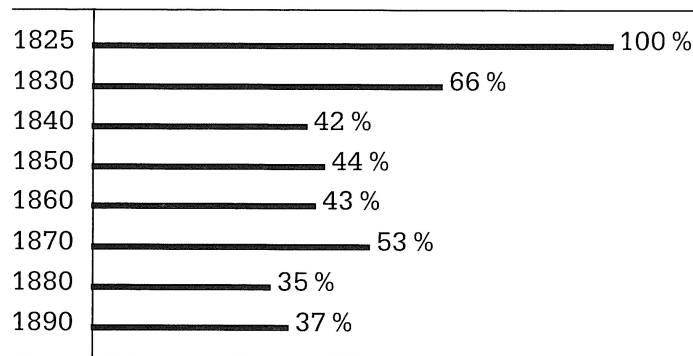


Abb. VII. 18: Bezogene Preise für Roheisen in England und Schottland nach Werner und Seidel

Das *Quadrant-Eisen* (Abb. VII. 19 u. Abb. VII. 20) war eine alternative Lösung, um aus Halbzeugen durch Vernieten oder Verschrauben ein Rohrstrukturelement aus Stahl zu formen, das im Durchmesser und seiner Wandstärke über den üblichen Rohrabmessungen, gewonnen durch Ziehen oder Schmiede-Schweißen, lag. Die Form ließ sich günstig aus Blechstreifen walzen; ein Viertelkreisbogen (Quadrant) wurde integral mit Längsflanschen, sog. *Kappen* zur Vernietung in einem Arbeitsschritt geformt – vier *Quadrant-Eisen* konnten passgenau zu einem Kreisquerschnitt zusammengefügt werden, die vier Kappen standen nach außen sichtbar ab und trugen zur Versteifung gegen Beulen wesentlich bei.

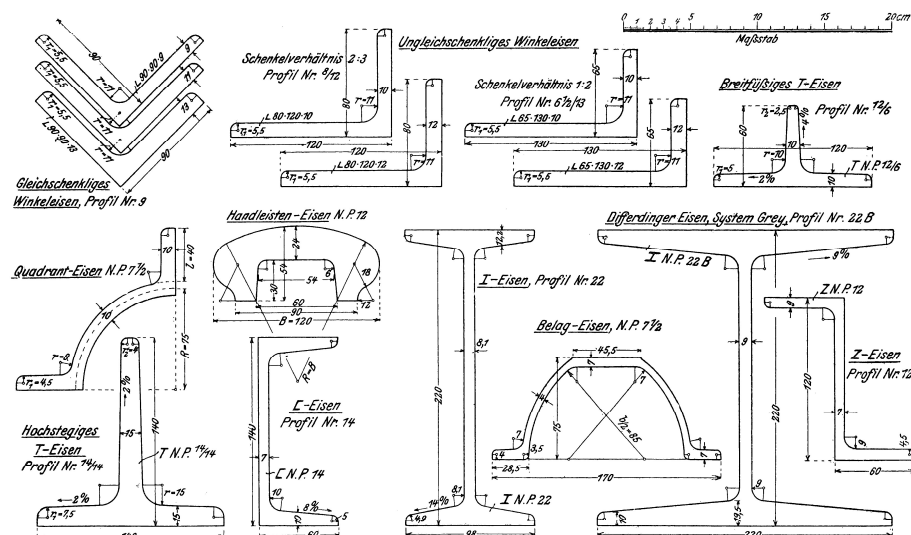


Abb. VII. 19: Walzprofilsortiment um 1920 mit Quadrant-Eisen, Mitte links

In den Jahren 1879-80 erschien das erste *Deutsche Normalprofil-Buch für Walzeisen zu Bau- und Schiffbauzwecken*³² im Namen des Verbandes Deutscher Architekten- und Ingenieurvereine, herausgegeben von Otto Intze (1843-1904) und Friedrich Heinzerling (1824-1906), das auch normierte Quadrant-Eisen aufführte (Abb. VII. 20) und ihren Charakter und ihr Anwendungsgebiet wie folgend erläutert:

„Die in ihrer Zusammensetzung zu einer, aus je 4 Theilen bestehenden Röhre für solche Konstruktionstheile, wo starker Axialdruck und Knickung zu berücksichtigen sind, vortheilhaftesten Quadranteisen bilden fünf Gruppen von 50, 75, 100, 125 und 150 mm mittleren Radius des Rohrquerschnittes. Jede dieser Gruppen enthält 2 Normalprofile von verschiedenen Wandstärken, wovon die geringste Wandstärke der ersten Gruppe 4 mm, die grösste Wandstärke der fünften Gruppe 18 mm beträgt. Da die Quadranteisen ähnlich wie die Winkelisen gewalzt werden, so ist auch hier eine Veränderung der bei den Fertigprofilen festgesetzten Stärken zulässig. Die zur Verbindung der Quadranteisen dienenden Kappen sind so breit und stark angenommen, dass eine bequeme Vernietung und eine feste Verbindung möglich ist. Des leichteren Auswalzens wegen haben die äusseren Ecken der Quadranteisen die entsprechende Abrundungen mit grösseren und kleineren Radien erhalten.“³³

Mit Lieferlängen von 10 bis 15 m konnten Stablängen zusammengesetzt werden, die oberhalb der erreichbaren Längen von Gussstützen gleicher Schlankheit lagen. Da der Walzstahl der *Quadrant-Eisen* nietbar war, konnten die *Quadrant-Eisen-Stäbe* auch mit anderen Teilen einer Stahlhochbaukonstruktion kraftschlüssig verbunden werden, da Bleche

³² Siehe: Heinzerling/Intze: Normalprofil-Buch Walzeisen, 1880

³³ Heinzerling/Intze: Normalprofil-Buch Walzeisen, 1897, S. 24

direkt von den Kappen umschlossen werden konnten. Diese Art der Assemblierung erlaubte es auch, zusätzliche, sich kreuzende Bleche im Innern anzuordnen, die die Traglast weiter steigerten.

29

Normale Quadrant-Eisen.

Regellängen = 1 bis einschließ-
lich 10 m.

Lagerlängen = 5 bis 14 m in Ab-
stufungen von 500 mm.

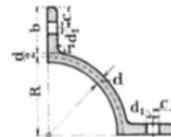
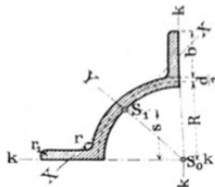
i = Trägheitshalbmesser der vollen
Röhre.

$b = 0,2 R + 25$ mm.

$r = 0,12 R$; $r_1 = 0,06 R$.

S_1 = Schwerpunkt eines
Quadranteisens.

S_0 = Schwerpunkt der vollen
Röhre.



Angaben für 1 Quadranteisen.

NP.	Abmessungen				Voller Quer- schnitt	Ge- wicht	Ab- stand für S_1	Wurzel- maß	Größter Niet- durch- messer	Trägheits- momente			NP.
	R	b	d	r	F	G	S_1	c	d_1	J_x	J_y	J_k	
	mm	mm	mm	mm	qcm	kg/m	mm	mm	mm	cm ⁴	cm ⁴	cm ⁴	
5 min.	50	35	4	6	7,44	5,84	3,46	20	12	3,59	110	144	5 min.
5 max.	50	35	8	6	12,00	9,42	3,47	20	12	6,37	159	227	5 max.
7 1/2 min.	75	40	6	9	13,7	10,75	4,95	20	12	7,69	360	517	7 1/2 min.
7 1/2 max.	75	40	10	9	20,0	15,70	4,97	20	12	13,3	479	745	7 1/2 max.
10 min.	100	45	8	12	22,0	17,27	6,43	24	16	16,5	909	1366	10 min.
10 max.	100	45	12	12	30,0	23,55	6,49	24	16	25,1	1144	1870	10 max.
12 1/2 min.	125	50	10	15	32,2	25,28	8,02	25	16	37,5	1876	3039	12 1/2 min.
12 1/2 max.	125	50	14	15	42,2	33,13	8,00	25	16	49,2	2386	3945	12 1/2 max.
15 min.	150	55	12	18	44,6	35,01	9,51	28	20	73,2	3549	5909	15 min.
15 max.	150	55	18	18	62,6	49,14	9,54	28	20	104	4633	8079	15 max.

Angaben für 4 Quadranteisen (volle Röhre).

NP.	Voller Quer- schnitt	Ge- wicht	Trägheits- Moment für jede Biegungs- achse	Träg- heits- halb- messer	Grenz- Knick- länge nach Tetmajer	Größtes Wider- stands-Moment W_z	Kleinst. Widerstands- Moment $W_x = W_y$	NP.
	F	G	J	i	$l = 105 i$	W_z	$W_x = W_y$	
	qcm	kg/m	cm ⁴	cm	cm	cm ³	cm ³	
5 min.	29,8	23,86	576	4,40	462	89,6	66,2	5 min.
5 max.	48,0	37,68	908	4,34	456	135	102	5 max.
7 1/2 min.	54,8	43,00	2068	6,14	645	237	175	7 1/2 min.
7 1/2 max.	80,0	62,80	2980	6,09	639	331	248	7 1/2 max.
10 min.	88,0	69,08	5464	7,88	827	497	367	10 min.
10 max.	120,0	94,20	7480	7,89	828	664	495	10 max.
12 1/2 min.	128,8	101,12	12156	9,70	1018	917	675	12 1/2 min.
12 1/2 max.	168,8	132,52	15780	9,66	1014	1165	867	12 1/2 max.
15 min.	178,4	140,04	23636	11,49	1206	1522	1120	15 min.
15 max.	250,4	196,56	32316	11,36	1192	2029	1510	15 max.

Abb. VII. 20: Genormte Quadrant-Eisen im deutschsprachigen Raum

Der geplante *Centennial Tower* (Abb. VII. 22) für die Weltausstellung in Philadelphia 1875/76 ist wohl die ambitionierteste Konstruktion mit einer Variation des *Quadrant-Eisens*, hier dem *Sextant-Eisen* mit dem Handelsnamen *Phoenix Column*. Der Turm sollte mit tausend Fuß einen neuen Höhenrekord erreichen und als sichtbares Monument zum 100. Geburtstag der Vereinigten Staaten von Amerika ein selbstbewusstes Zeichen setzen:

“It is clear that, within the coming two years, no monument of so imposing a nature, or of so unique and original conception, can be constructed of any other material than iron, nor, indeed, can we hope to erect a fabric more completely national in every feature. Not only then shall we commemorate our birthday by the loftiest structure ever built by man, but by an edifice designed by American engineers, reared by American mechanics, and constructed of material purely the produce of American soil.”³⁴

Die Konstruktion wurde von Messrs. Clarke, Reeves & Co. als freistehender Turm mit vier Aussichtsplattformen vorgeschlagen. An der Basis war ein Durchmesser von 150 Fuß vorgesehen, der sich am Kopf auf 30 Fuß reduzieren sollte. Das äußere Traggerüst sollte von 20 Röhren in Kreisanordnung aus *Phoenix Columns* (Abb. VII. 21) zusammengesetzt werden, die einen konstanten Innendurchmesser von 11“ (279,4 mm) aufwiesen und deren Wandstärke mit zunehmender Höhe abnehmen sollte. Auskreuzungen und horizontale Streben sollten die 32 Etagen aus *Phoenix Columns* aussteifen. Im Inneren war eine Kernröhre von 30 Fuß Durchmesser zur Aufnahme von drei Aufzügen geplant, die von einer Spiraltreppe umwunden werden sollte.

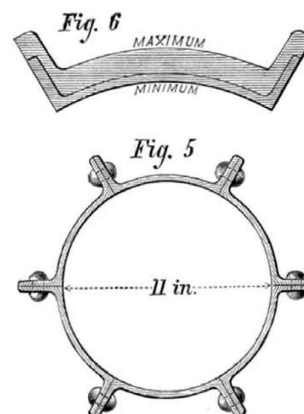


Abb. VII. 21: Zusammengesetzter Röhrenquerschnitt mit variabler Wandstärke des Centennial Towers

³⁴ o.A.: Centennial Tower, 1874, S. 50

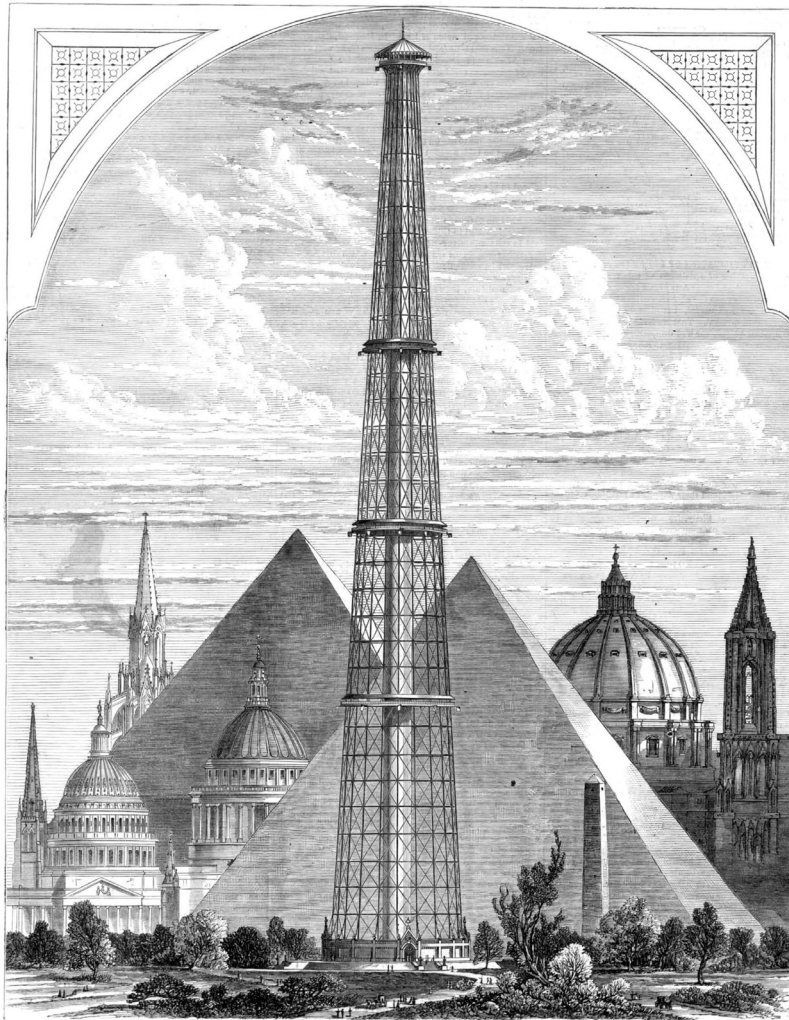
SCIENTIFIC AMERICAN

A WEEKLY JOURNAL OF PRACTICAL INFORMATION, ART, SCIENCE, MECHANICS, CHEMISTRY, AND MANUFACTURES.

Vol. XXX.—No. 4.
[NEW SERIES.]

NEW YORK, JANUARY 24, 1874.

\$3 per Annum
IN ADVANCE.



THE CENTENNIAL TOWER ONE THOUSAND FEET HIGH.—[See page 50.]

© 1874 SCIENTIFIC AMERICAN, INC.

Abb. VII. 22: Höhenvergleich des Centennial Towers, nicht ausgeführt, Philadelphia 1874

7.7 Rohre in der frühen Waffentechnik

Eine weitere Entwicklungslinie des Rohrs aus Metallwerkstoffen erkennt man im technischen Apparatebau von Mess- und Musikinstrumenten oder Waffen. Es diente auch hier einerseits als lineares, räumliches Kontinuum dem Medientransport in Form von Rohrleitungssystemen und andererseits als Druckbehältern beziehungsweise als Kraftkolbenmaschinen aus der Gruppe der Fluidenergiemaschinen bei den Feuerwaffen. Die Vorteile der metallischen Werkstoffe hinsichtlich Formfestigkeit, Dauerhaftigkeit und Verarbeitung wurden früh erkannt und rechtfertigten den Einsatz dieser anfangs raren Ressourcen. So ermöglichte der Metallguss die ersten effektiven Feuerwaffen in Europa ab dem 14. Jahrhundert, zunächst aus Bronze und wenig später auch aus Gusseisen.

Anm.:

Sir Benjamin Thompson, Graf Rumford, (1753-1814) leistete einen ersten Beitrag im Gebiet der Thermodynamik, indem er die seinerzeit gültige Stofftheorie der Wärme durch Beobachtung der Wärmentwicklung beim Bohren der Kanonenrohre in München widerlegte. In seinem Aufsatz *An inquiry concerning the Source of the Heat which is excited by Friction*, gelesen an der Royal Society am 25. Januar 1798, wird verdeutlicht, dass die Reibungswärme keine endliche Größe ist, die durch die Masse des Körpers begrenzt ist. George E. Ellis berichtet dazu:

„He was engaged in superintending the boring of cannon in the workshops of the Elector's arsenal and foundry in Munich, when his attention was arrested by observing the considerable degree, of heat which a brass gun so soon acquires in being bored. [...] It was evident, then, that the heat produced by boring was not furnished at the expense of the latent heat of the metallic chips.“ Aus: Ellis: Benjamin Thompson, 1871, S. 475f

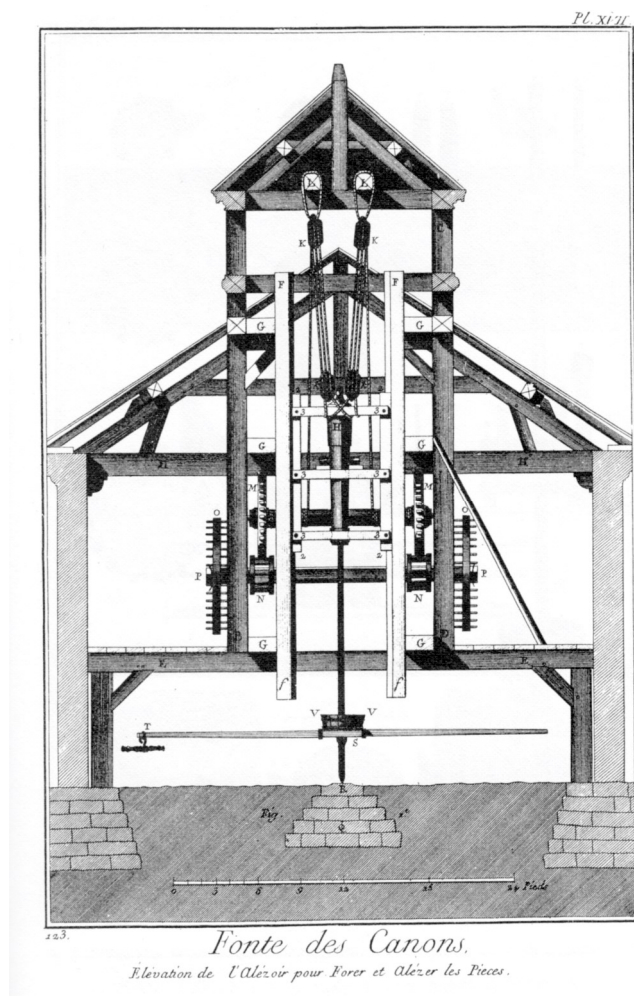


Abb. VII. 23: Bohrrapparat zum Kalibrieren von gegossenen Kanonenrohren, Frankreich 18. Jh.

Die Kalibrierung der frühen, glattläufigen Hinterlader Geschützen erfolgte aber erst durch das Aufbohren in großen Bohrgestellen (Abb.

VII. 23). Mit Hilfe der Antriebskraft von Nutztieren wurde ein Bohrgestänge mit Hartmetall bestückten Fräsköpfen (Abb. VII. 24) direkt angetrieben.

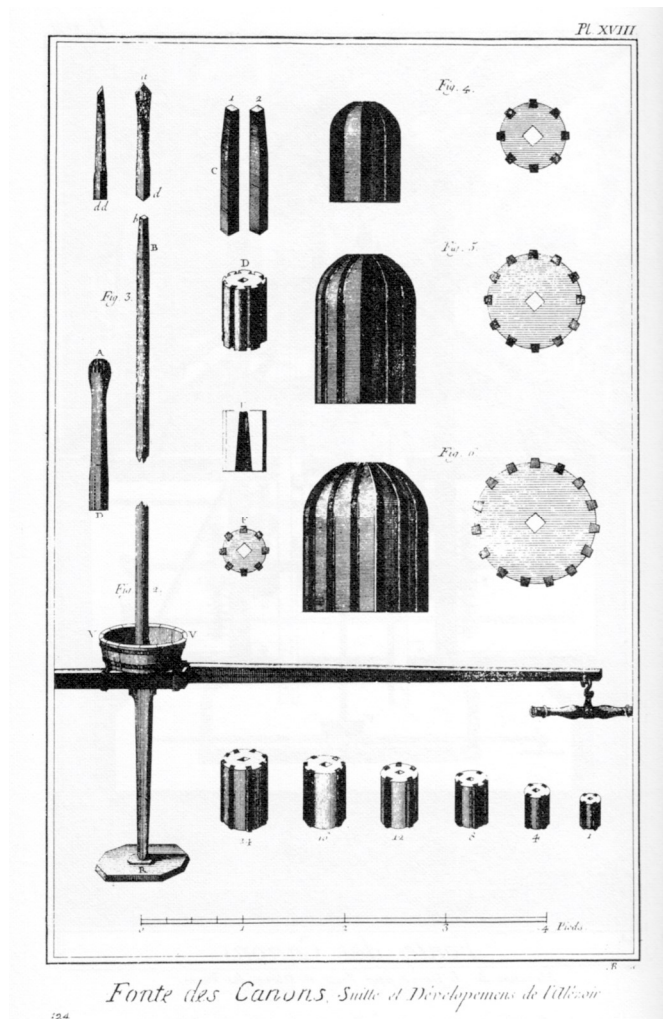


Abb. VII. 24: Bohrköpfe zum Kalibrieren von gegossenen Kanonenrohren, Frankreich 18. Jhd.

Parallel zu diesem Formgebungsprozess aus Gießen und Bohren zum Kalibrieren von Geschützen, erforderte die Produktion von Handfeuerwaffen deutlich kleinere Rohrdurchmesser und Wandstärken, die sich durch Schmiedeschweißen aus schmiedeeisernen Blechen fertigen ließen. Eine Metallstange (Dorn) mit Durchmesser des Kalibers wurde vom Büchsenmacher als Matrice zum Schmieden genutzt und vor dem Erkalten gezogen. Marks³⁵ nimmt an, dass die Fertigung von Handfeuerwaffen die wichtigsten Impulse zur industriellen Fertigung von schmiedeeisernen Rohren bildete und mit frühen Erfindern, wie Henry Osborn (?-1827) oder Cornelius Whitehouse (1795-1883), in Verbindung stehen.

³⁵ Vgl.: Marks: *Manufacture of Tubes*, 1903, S. 1-4

7.8 Erste Gussstützen in der Architektur

Nach Christian Schädlich³⁶ wird die erste baukonstruktive Verwendung von Gusseisenstützen auf das Jahr 1685-88 für die Paläste Golizyns in Moskau nachgewiesen, und noch 1752 war die aufgeständerte Herdhaube in der Klosterküche von Alcobaça, Portugal, nach Meinung von Turpin Bannister³⁷, ein Alleinstellungsmerkmal seiner Zeit. Was zunächst vor dem Hintergrund der belegten vielfältigen Anwendungen von Rohren aus Metallwerkstoffen anachronistisch wirkt. Tatsächlich schien lange Zeit die einfache Umwidmung von Leitungsrohren oder Kanonenrohren zu Tragstrukturelemente nicht stattzufinden - wohingegen Gewährläufe bei William Murdoch ihren Weg zu den Leitungsrohren fanden. Auch das konsequente Recyceln des Metalls von Kanonenrohren durch Umschmelzen zu ausschließlich neuen Waffen ist keine ausreichende Erklärung hierfür, da bedeutende Stückzahlen als Bauschmuck, wie an der Siegessäule zu Berlin, endeten oder degradiert als Pfosten und Prellsteine Uferkanten und Hofdurchfahrten schützten. Diese Profanisierung wurde so stilprägend, dass heute noch Stadtmobiliar mit Designbezügen zu den klassischen Hinterlader-Kanonenrohren gefertigt wird.

Die Befunde für die Verwendung von Schmiedeeisen als Zugstäbe sind dagegen deutlich älter und wurden spätestens in der Gotik als Zuganker zur Sicherung des Horizontalschubes beim Kathedralenbau³⁸ in signifikanter Menge planmäßig eingesetzt. Die Zugfestigkeit wurde von keinem historischen Werkstoff annähernd erreicht, sodass der Einsatz eine hohe Effizienz bei gleichzeitig hoher Effektivität besaß. Dagegen wurde die Übertragung von vertikalen Druckkräften im Bauwesen durch die Materialien Holz, Ziegel und Naturstein für Stützen, Pfeiler und Streben in einer ökonomischen Dimension für die traditionellen Bauaufgaben gewährleistet, sodass die Effizienzpotenziale der Röhren aus Eisenwerkstoffen noch nicht ausgeschöpft werden konnten.

7.8.1 Die Eisensäule von Neu Delhi

In der chronologischen Erfassung von Stäben aus Eisenwerkstoffen im Bauwesen darf daher die indische Säule (Abb. VII. 25) nicht fehlen, wenngleich sie, aus Schmiedeeisen massiv gefertigt, eine Ausnahme war und über Jahrhunderte eine Singularität blieb, ohne Impulse für die

³⁶ Siehe: Schädlich: Eisen in der Architektur, 2015, S. 119

³⁷ Siehe: Bannister: The First Iron-Framed Buildings, 1950, S. 231-246

³⁸ Siehe: Kimpel/Suckale: Gotische Architektur, 1995, S. 549

Bautechnik zu geben. Der Eisen-Werkstoff war zu ihrer Entstehungszeit vor ca. 1600 Jahren rar und seine Verarbeitung selten und sehr aufwendig, sodass es sich hier nicht um eine funktionale und angemessene Materialwahl handelte, sondern um eine Demonstration der technologischen Beherrschung und der Verfügbarkeit über kostbare Ressourcen.



Abb. VII. 25: Delhi Iron Pillar, massive Schmiedeeiserne Säule, ca. 400 n.Chr.

Die indische Säule³⁹ von Neu Delhi auf dem Qutub Minar Komplex stand ursprünglich in Udayagiri und wird auf 400 n.Chr. datiert. Ursprünglich trug sie eine Chakra-Figur und diente wohl astronomischen Peilungen. Die Gesamthöhe beträgt heute 7,11 m, wobei die oberen 1,52 m durch ein aufgestecktes Zierkapitell gebildet werden; die Säule ist heute ca. 0,9 m tief eingegraben. Der Schaft verjüngt sich von 0,61 m Durchmesser auf 0,31 m unterhalb des Kapitells und ist massiv in Schmiedeeisen ausgeführt, das in seiner günstigen metallurgischen Zusammensetzung dem Rost widersteht.

³⁹ Siehe: BaiaSubramaniam: Delhi iron Pillar, 2004, S. 5-13

7.8.2 Die feuerfesten englischen Textilfabriken

Es waren zunächst andere Aspekte, die den Gebrauch von Gusseisen in der Architektur beförderten. Neben der deutlich höheren Druckfestigkeit gegenüber Holz, war es vor allem der Gießprozess selbst, der dem Gusseisen den Weg in die Bauwirtschaft ebnete. Ornamente konnten einfach vervielfältigt werden und bildeten eine feste Einheit mit dem tragenden Querschnitt, und wurden wegen ihrer Gestaltungskraft an repräsentativen Orten verbaut⁴⁰. So wurden die ersten Säulen aus Gusseisen für den Innenausbau von Kirchen genutzt, so geschehen in St. Anne's Church, Liverpool 1770-72, und dem bereits erwähnten Palast Golizyn in Moskau von 1685. Erst die neue Bauaufgabe der mehrstöckigen Manufaktur, respektive Fabrik, der Tuchwebereien in England verhalf dem Gusseisen als Konstruktionsmaterial zum Durchbruch im Bauwesen, wenn auch hier die vermeintliche Feuerbeständigkeit gegenüber den Holzkonstruktionen zunächst ausschlaggebend war.

Typologischer Ausgangspunkt ist nach Bannister die Silk Mill⁴¹ in Derby von John Lombe, 1718-1722: Ein Ziegelbau auf rechteckigem Grundriss, ca. 13 m x 36 m, mit fünf Stockwerken aus Holzbalken mit Bretterlage und Holzständern, beleuchtet durch 468 Fenster. Das Öl zur Schmierung der Maschinenteile, fein verteilte Fasern und die nächtliche Beleuchtung durch Kerzen stellte eine erhöhte Brandgefahr gegenüber den traditionellen Lagerhäusern dar. So lassen sich schon 1776 erste konstruktive Einheiten aus gusseisernen Stützen und Trägern in der Flachsspinnerei⁴² in Shrewsbury nachweisen. William Strutt war es schließlich, der nach dem verheerenden Brand der Londoner Albin Mill 1791, ab 1792 mit dem Bau der ersten *vollständig feuerfesten* Mühle Calico⁴³ in Derby das Gusseisen konstruktiv in den Mittelpunkt stellte, und mit 6 Stockwerken einen neuen Maßstab setzte.

7.8.3 Frühe Beispiele aus dem deutschsprachigen Raum

Die Sayner Hütte mit ihrer Gießhalle von 1827-1830, nach Plänen von Carl Ludwig Althans (1788-1864), gilt als die erste Gusseisen-Hochbaukonstruktion im noch jungen Industriebau im deutschsprachigen Raum. Gusseiserne Hohlstützen von ca. 6,5 m Höhe bilden die Hauptstützen des Basilika-Grundrisses und nehmen zusätzlich Kranlasten und eine zweite Verkehrsebene neben dem gusseisernen Dachtragwerk auf. Diesem frühen Beispiel für die Erschließung der Leistungsfähigkeit

⁴⁰ Siehe: Betschart: Gusskonstruktionen, 1985, S. 15

⁴¹ Siehe: Bannister: The First Iron-Framed Buildings, 1950, S. 231

⁴² Siehe: Betschart: Gusskonstruktionen, 1985, S. 12

⁴³ Siehe: Bannister: The First Iron-Framed Buildings, 1950, S. 236

von gusseisernen Tragelementen stehen, zeitlich parallel, dekorative Verwendungen im Bauwesen gegenüber. Ein Beispiel dafür ist das Mundloch (Abb. VII. 26) des Herzog-Alexius-Erbstollens in Mädgesprung von 1830. Ein gusseiserner klassizistischer Säulenportikus mit zwei dorisch-tuskischen Säulen ist einem Häuschen aus Bruchsteinmauerwerk als Bauschmuck vorgesetzt.



Abb. VII. 26: Mundloch des Herzog-Alexius-Erbstollens bei Mädgesprung mit gusseisernem klassizistischem Säulenportikus, 1830

Beim Eisenmagazin der Königshütte in Bad Lauterberg von 1828 sind die vier dorischen Säulen bereits in den Lastabtrag des Giebelfeldes und des 1. Obergeschosses planmäßig mit einbezogen. Aber auch in diesem Fall ist die Proportionierung der geringen Schlankheit der Säulen dem historisierenden Baustil geschuldet und nicht den erhöhten Lastfällen wie im Fall der Sayner Hütte.

7.8.4 Die Gussstütze als Systembauteil

Das Gusseisen hatte von seinem Ursprung her seine Eignung für freie Formen und feine Strukturen im Dienste der Ornamente und Gebrauchsgegenstände bewiesen, und war hervorragend dazu geeignet optimierte Querschnitte und Anschlusspunkte im baukonstruktiven Sinne zu formen.

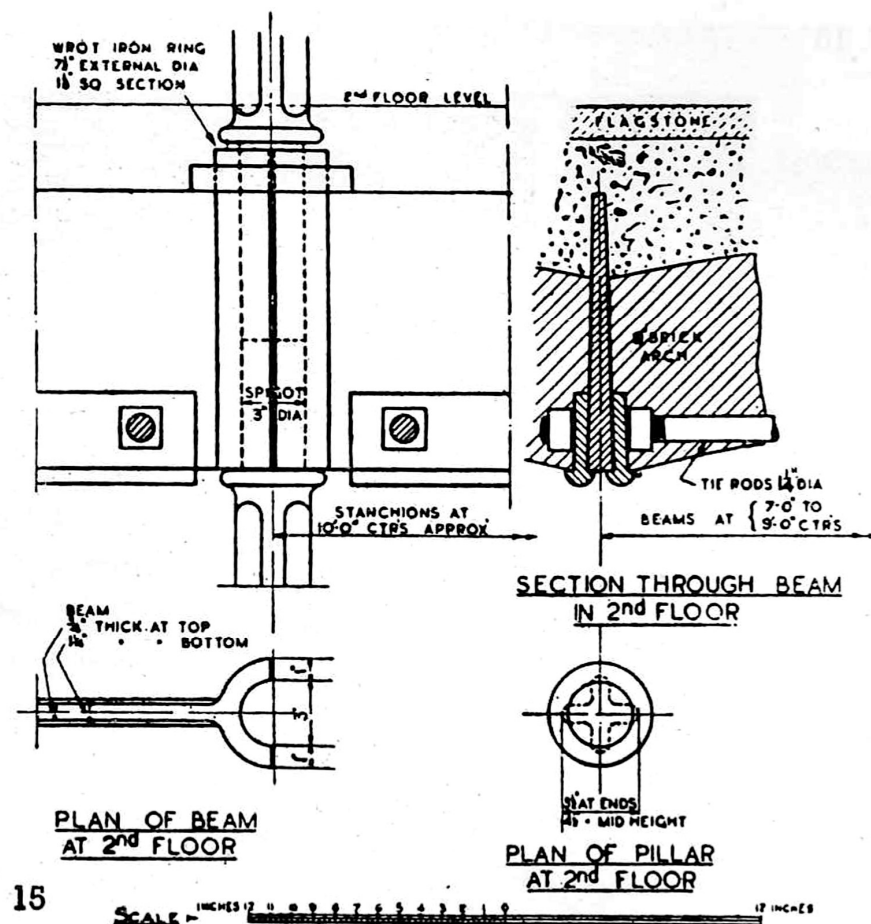


Abb. VII. 27: Standardknoten der Benyon and Bage Flax Mill in Leeds, ca. 1804

Schon die ersten Gussstützen variierten das kreisrunde Rohr zum Kreuzquerschnitt (Abb. VII. 27) und fanden im Systembau des Kristallpalastes (Abb. VII. 28) 1851 in London einen Höhepunkt.

Waren die ersten Verbindungsdetails noch dem Holzbau entlehnt, so an der Coalbrookdale Brücke ausgeführt, wurden die Knotenpunkte zur Auflagerung guss- und schmiedeeiserner Träger optimiert und geometrisch komplexer. Es dauerte aber bis zum ersten Drittel des 19. Jahrhunderts, bis die Flanschenverbindung, im Leitungsbau seit 1686 bekannt, für die planmäßige Übertragung von Kräften nutzbar gemacht wurde.

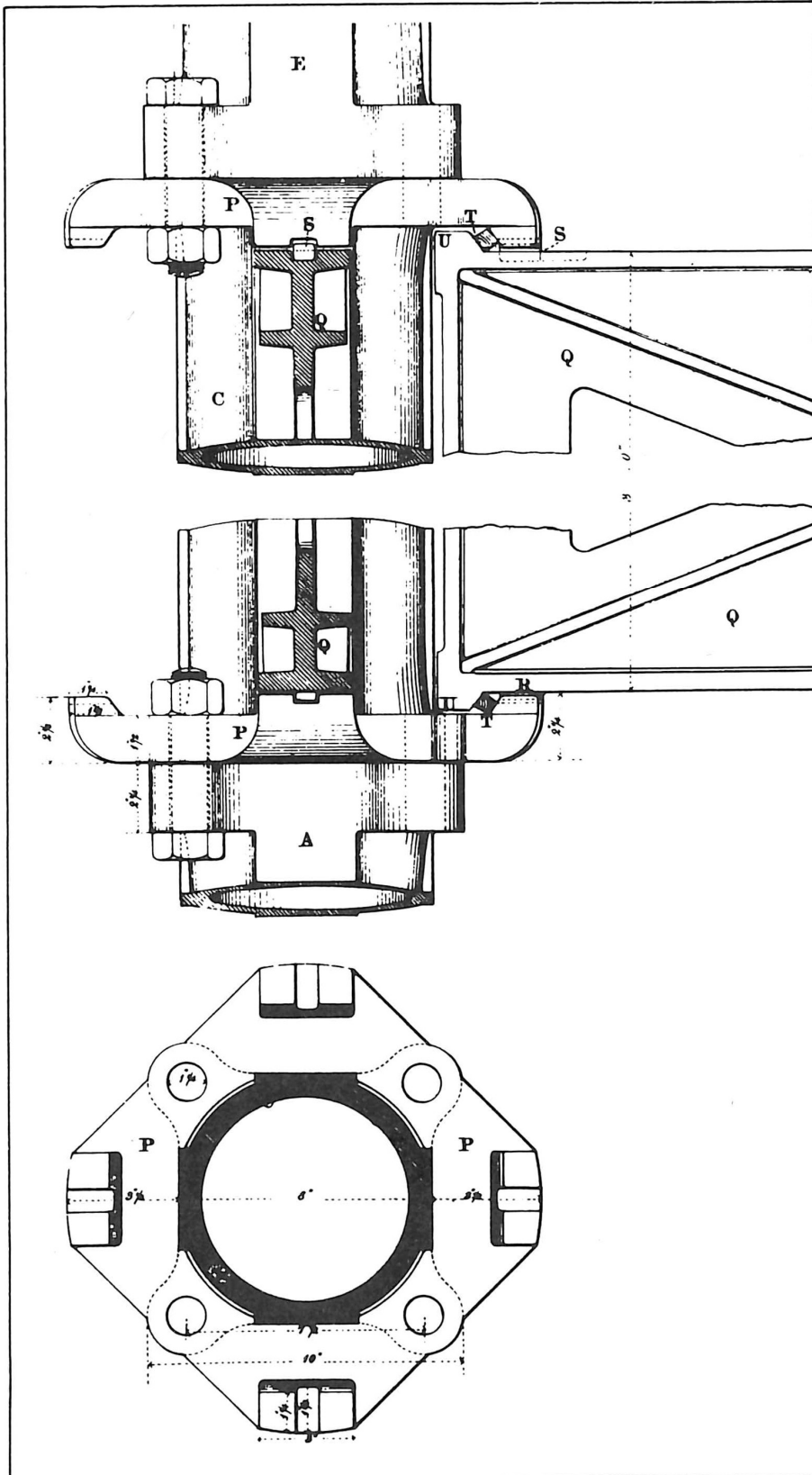


Abb. VII. 28: Standardknoten zur Verbindung der gusseisernen Hohlstütze und dem schmiedeeisernen Fachwerkträger, Cristal Palace 1851

7.9 Gusseiserne Röhrenbrücken

Ernst Werner schreibt in seiner Dissertation *Die ersten eisernen Brücken*⁴⁴ über Reichenbach (1777-1826), dass er auf einer Englandreise eine 30 m hohe Konstruktion in Gussrohrbauweise studiert haben soll, deren Anschlüsse über verschraubte Flanschen erfolgte, ähnlich der Abb. VII. 29. Reichenbach habe dies zum Vorbild genommen, um daraus

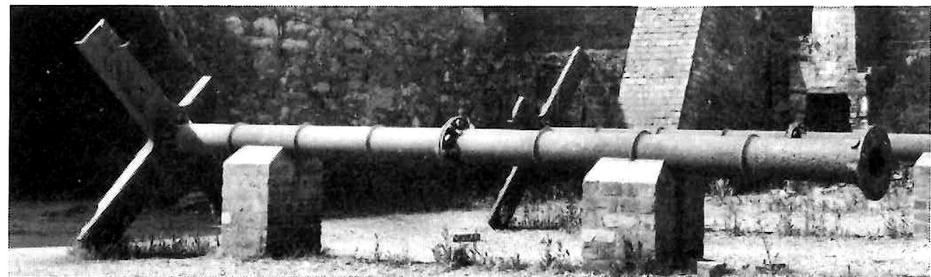


Abb. VII. 29: Zusammengesetzte Gussstütze mit Flanschen, erste Hälfte 18. Jhd. England

ein Konstruktionssystem für Bogentragwerke aus Gussrohren mit Flanschen bis 1809 zu entwickeln und schließlich 1811 zu publizieren.^{45,46,47,48,49}

Schon 1850 berichtete Hinrich Müller in seinem Werk *Die Brückenbaukunde in ihrem ganzen Umfange* im vierten Band *Die Erbauung der eisernen Brücken* von drei Technikern, die Bogenkonstruktionen aus hohlen Gusseisenquerschnitten vorstellten:

Gauthey nimmt danach selbst im Anspruch, als Erster die Verwendung von Gusseisenrohren zur Konstruktion von Bogenkonstruktionen bereits im Januar 1805 vorgeschlagen zu haben; Anlass war der Bau der Brücke von l'Archevêché bei Lyon. Neben einem Aufriss sind keine weiteren konstruktiven Details des unausgeführten Entwurfes überliefert.

Das *System Wiebeking*⁵⁰ bedient sich gusseiserner Rohre von ca. 8-9 Fuß Länge mit gerader Achse bei einer Wandstärke von 18 Linien. Das Rohr hat keine Flanschen und ist an beiden Enden schräg zugeschnitten, sodass zwei Rohre zueinander eine schräge, elliptische Kontaktfläche ausbilden (Abb. VII. 30). Diese Verschiftung soll durch ein innenliegendes Rohr so zwei Rohre miteinander verbinden. Ein viertes

⁴⁴ Siehe: Werner: *Erste eiserne Brücken*, 1974

⁴⁵ Siehe: Müller: *Röhrenbrücken von Gußeisen*, 1850

⁴⁶ Siehe: Becker: *Brückenbau*, 1858, S. 142

⁴⁷ Siehe: Heinzerling: *Brücken in Eisen*, 1870, S. 100ff

⁴⁸ Siehe: Heinzerling: *Brückenbauten*, 1868/69, S. 70

⁴⁹ Siehe: Mehrtens: *Eisenbrückenbau*, 1908, S. 285f

⁵⁰ Siehe: Müller: *Röhrenbrücken von Gußeisen*, 1850, S. 59ff

Rohr wird als Hülse über die Stoßfuge geschoben und durch passgenaue Löcher mit Schraubenbolzen fixiert. Müller merkt kritisch an⁵¹, dass diese Ausführung nicht materialgerecht sein kann, da der spröde Werkstoff Gusseisen nicht zur Herstellung von ausreichend geringen Toleranzen geeignet sei. Sind die Toleranzen groß, käme es zu Verdrehungen innerhalb der Schiftungen und der Hülse, sodass die Kontaktbereiche unzulässige Spannungsspitzen für Gusseisen aufweisen müssten. Dass die Bogenform des Tragwerks mit Tragwerkselementen mit gerader Rohrachse realisiert werden sollte, weist auf einen weiteren Widerspruch dieses Ansatzes hin. Es sollte somit bei drei nicht realisierten Entwürfen mit geplanten Spannweiten von bis zu 306 Fuß bleiben.

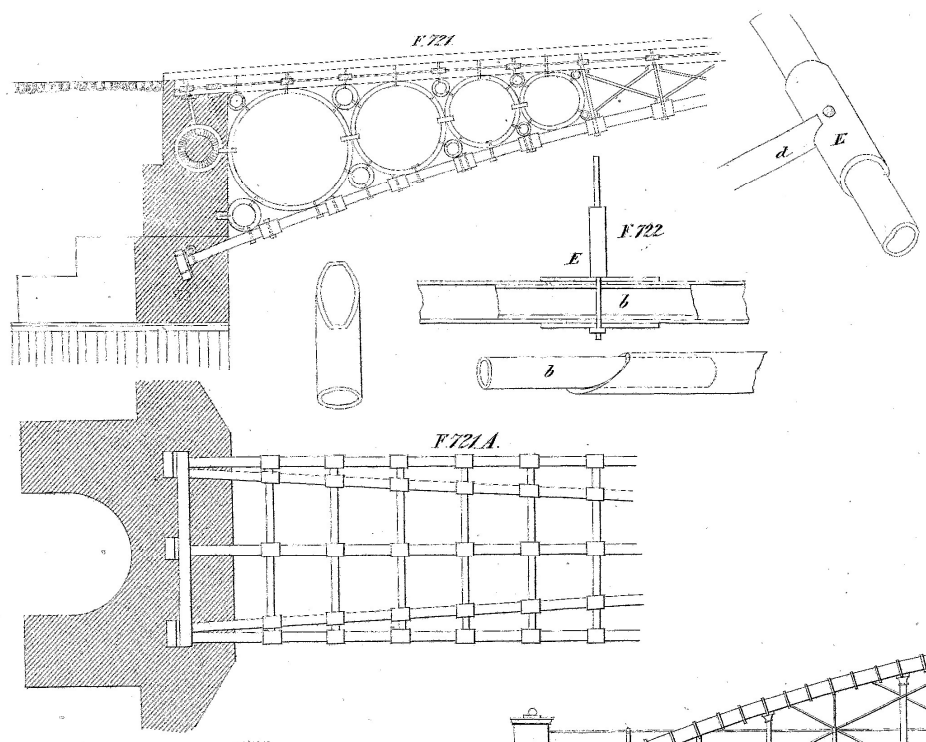


Abb. VII. 30: System Wiebeking mit geschifteten Röhren, Ausschnitt, 1830er Jahre

Das *System Reichenbach* wird dagegen als innovativ von Müller⁵² eingeschätzt und mit gebauten Entwürfen belegt. Die (Abb. VII. 31) zeigt das Detail einer Flanschenverbindung mehrerer Rohre miteinander, wobei das mittlere ein T-Stück darstellt. Die eigentliche Flanschenverbindung weicht im Detail des Überganges zum anderen Rohr im Innern des Rohres von denen bei Rohrleitungen ab. Das rechte Rohr greift unter Verengung des Querschnittes in das linke Rohr über, sodass eine formschlüssige Querkraftübertragung gewährleistet ist und die Verschraubung nur durch Zugkräfte beansprucht werden muss, wie sie ggf.

⁵¹ Siehe: Müller: Röhrenbrücken von Gußeisen, 1850, S. 61

⁵² Siehe: Müller: Röhrenbrücken von Gußeisen, 1850, S. 62ff

bei Bogenkonstruktionen mit abweichender Stützlinie auftreten können. Reichenbach empfahl die Kontaktstöße der Anstoßscheiben (Flanschen) mit einem zähen Kitt⁵³ aus Leinenöl, gelöschtem Kalk und Hanffasern zu belegen, der nach dem Verpressen durch das Anziehen der Schraubenbolzen eine gleichmäßige Druckkraftübertragung bei den Gussformstücken sicherstellen soll. Das T-Stück, aus dem Leitungsbau bekannt, wird hier zum Knoten für vier Stäbe und ermöglicht die Konstruktion doppelter Bögen. Der untere Bogen wird danach aus Röhren mit 15 Zoll Durchmesser bei einer Wandstärke von 1 Zoll gebildet, die 3,5 Zoll breiten Flanschen konvergieren zum Mittelpunkt des Kreisbogens und werden durch vier kräftige Schraubenbolzen verbunden. Eine Brücke dieser Bauart soll mit 306 Fuß Spannweite errichtet worden sein, ohne dass Müller hierfür den Standort nennt.

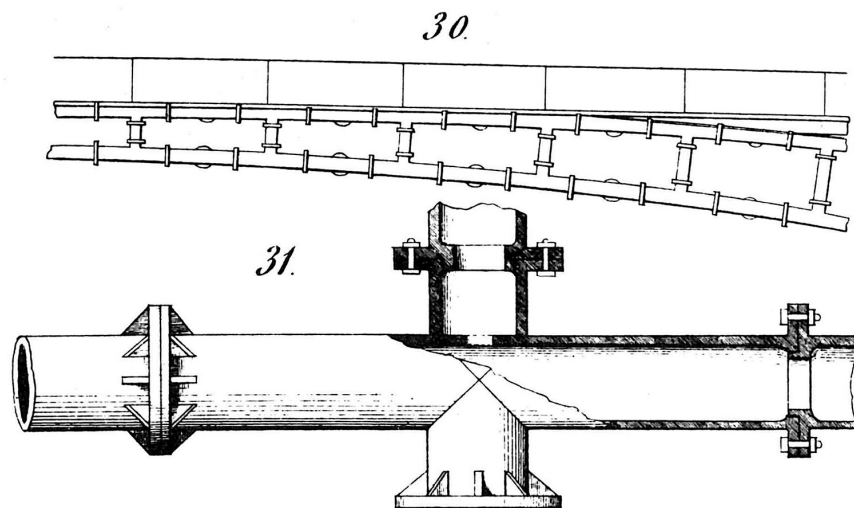


Abb. VII. 31: System Reichenbach mit formschlüssigen Flanschen, 1830er

Die Röhren-Brücke über den Hammerstrom bei Peitz (Abb. VII. 32) ist das früheste Beispiel für die baukonstruktive Verwendung einer Variation der Reichenbach'schen Flanschenverbindung zur planmäßigen Übertragung von Kräften. Waren die Flanschen ursprünglich wegen ihrer Dichtigkeit für Druckleitungen entwickelt worden, so dienen sie in diesem frühen Beispiel der Lagesicherung zur Übertragung der Normalkräfte und der Momenten-Belastung, resultierend aus dem der Stützlinie abweichenden Kreisbogenprofil des Brückenbogens. Im Gegensatz zu Reichenbachs Vorgaben, sind hier die Rohrflanschen ohne formschlüssige Querkraftübertragung ausgeführt. In der Allgemeinen Bauzeitung von 1837 wird die Brücke wie folgend beschrieben:

⁵³ Siehe: Müller: Röhrenbrücken von Gußeisen, 1850, S. 63

„Die Peitzer Brücke hat [...] unter dem Bogen eine lichte Weite von 34 Fuß, und ist im Belag $14\frac{1}{2}$ Fuß breit. Sie besteht aus vier Bögen, wovon jeder aus sieben Röhren, jede von 5 Fuß Länge, zusammengesetzt ist. Die Bogen sind nach einem Kreisstück mit einem Halbmesser von 57 Fuß geformt, und haben etwas über $\frac{1}{11}$ der Sehne zur Höhe. Sie stehen $4\frac{1}{2}$ Fuß von Mitte zu Mitte von einander entfernt. Der äußere Durchmesser der Röhren beträgt 8 Zoll, die Eisdicke derselben 1 Zoll, und der Durchmesser der eben so dicken Scheiben 14 Zoll. Die Bogen stämmen sich gegen eiserne Platten, und sind mit denselben durch Schrauben verbunden, die Widerlagsplatten aber durch Anker auf den Mauern befestigt.“⁵⁴

Anm.:
Ein Preußischer Fuß entspricht 31,3854 cm.

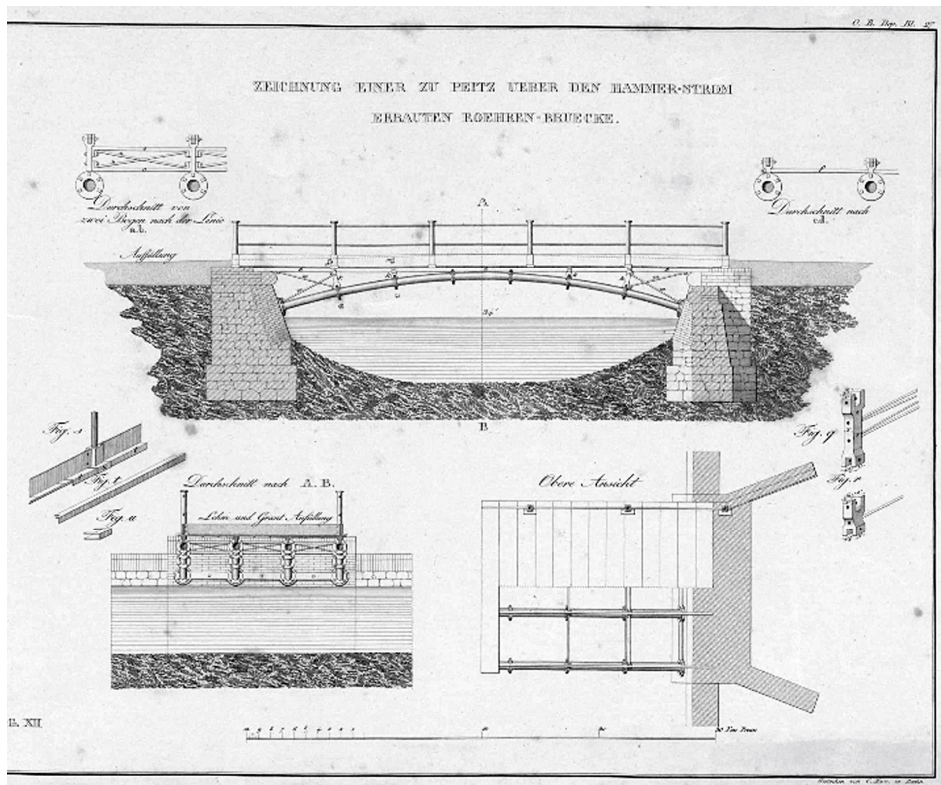


Abb. VII. 32: Röhrenbrücke über den Hammerstrom bei Peitz, 1829

Die Brücke wurde vom Hütten-Bau-Inspektor Nath entworfen und 1824 in Zorge von der Herzoglich-Braunschweigischen Hütte im Harz gegossen. Ein Probeaufbau erfolgte zunächst in Braunschweig über einen Seitenarm der Oker im Stadtgebiet um St. Aegidien, bevor sie 1828 an ihren Bestimmungsort am Peitzer Hüttenwerk verbracht wurde und dort bis 1841 bestand.

Herauszustellen ist die gebogene Form der sieben Bogensegmente mit präziser Ausbildung der Flanschen zueinander. Aus dem Leitungsbau waren gekrümmte Formstücke eine bekannte und notwen-

⁵⁴ o.A.: Brücke über den Hammerstrom, 1837, S. 59-61

dige Variante, deren Herstellung im Sandbettgussverfahren aber als aufwendig galt, fehlte doch die vorteilhafte Rotationssymmetrie gegenüber den geraden Rohrstücken. Für die präzise Fügung der sieben Elemente zum genannten Kreisbogensegment war hier das Abdrehen der Flanschplatten im korrekten Winkel notwendig; was bei Kenntnis der baulichen Toleranzen und den technischen Möglichkeiten beachtenswert ist. Dennoch war die Gebrauchstauglichkeit nach kurzer Standzeit eingeschränkt, da sich der Bogen um $1\frac{1}{2}$ Zoll in der Mitte absenkte und die ehemals horizontale Fahrbahn eine sichtbare Senke ausbildete. Nach erfolgter Demontage wurden Bleischeiben zwischen die Flanschen eingefügt, sodass sich eine leichte Überhöhung ergab, die nach erfolgter geringer Setzung nun einen stabilen und gebrauchstauglichen Zustand erreichte.

7.10 Gitterpfeiler für Viadukte

Die konstruktive Idee, Gittertürme aus gusseisernen Rohren zu bauen, hatte sich bei den ortsfesten Seezeichen (siehe Kapitel 7.6.3) ab den 1820er im angelsächsischen Einflussbereich erfolgreich bewährt. Die Vorteile dieser Bauart bestanden in der Vorfertigung, dem geringen Transport- bzw. Montagegewicht und einem günstigen Preis.

Diese Eigenschaften qualifizierten die Gitterturmkonstruktionen aus gusseisernen Röhren als Hochpfeiler für Viadukte der Eisenbahnstrecken, zunächst in Großbritannien und folgend insbesondere in Frankreich. Mit dem Ausbau des Schienennetzes in Gebirgsregionen galt, es die Steigung zwischen Tälern und Bergpässen durch Tunnel- und Brückenbauwerke zu egalisieren, da die Traktion der Dampflokomotiven für ebene Strecken ausgelegt war.

Mit dem Crumlin–Viaduct⁵⁵ von 1853 in Südwales wurde ein erstes Talbrückenbauwerk mit mehrschüssigen Gitterpfeilern errichtet. Je 14 Gussstützen mit einem Außendurchmesser von 305 mm und 5,185 m Länge wurden durch guss- und schmiedeeiserne Verbände in mehreren Schüssen zu einem Pfeiler der 10 Öffnungen von über 50 m Höhe gebündelt. Der hexagonale Perimeter des Gerüsts verjüngt sich mit zunehmender Höhe.

In der Schweiz folgte 1857 das Grandfey-Viadukt mit Pfeilern von 82 m Höhe, wovon die oberen 43,2 m wiederum aus gebündelten Gusseisenrohren von je 3,93 m Länge mit schmiedeeisernen Verbänden bestanden,⁵⁶ die jeweils auf einem Steinpfeiler ruhten.

Wilhelm Nördling (1821-1908) konnte beim Bau des Viaduc de Busseau⁵⁷ bereits auf die Erfahrungen der erstgenannten Viadukte zurückgreifen und die Bauweise optimieren. Hatte das Crumlin-Viaduct noch 14 Standrohre pro Pfeiler, waren es beim Viaduc de Busseau bereits nur noch 8 Standrohre. Die Gussrohre mit einem Durchmesser von 35 cm und einer Länge von 4,5 m wurden auch hier mit differenzierten Materialstärken gegossen; die Wandstärke betrug bei den unteren Rohren 55 mm und im oberen Bereich 40 mm.

Als Chefingenieur der französischen Eisenbahngesellschaft Compagnie d'Orleans, ab 1857, entwickelt er für die Strecke Commeny-Gannat⁵⁸ im französischen Zentralmassiv typisierte Bauweisen für höchste und hohe Pfeiler aus Gussrohren (Abb. VII. 33).

⁵⁵ Siehe: Gabjewski/Gottschalk: Viaduc de Crumlin, 1857

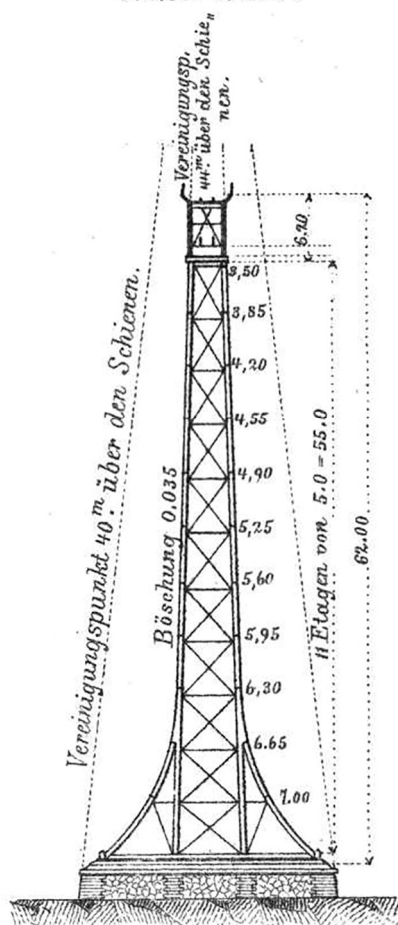
⁵⁶ Siehe: o.A.: Viaduc de Grandfey, 1867

⁵⁷ Siehe: Nördling: Metall Viadukte, 1874

⁵⁸ Siehe: Nördling: Metall Viadukte, 1874

A. Fig. 3.

Großer Pfeiler.



A. Fig. 14.

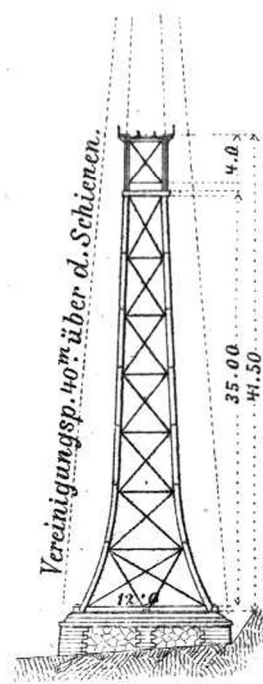
Seiten-Ansicht
des Pfeilers.

Abb. VII. 33: Gegenüberstellung der Pfeiler aus Gussrohren, Viaduct de Bouble Fig. 3 und Viaduc Neuvial Fig. 14, 1868

Es wurden auf dieser Streckenführung insgesamt 4 Viadukte unterschiedlicher Länge und Höhe mit Pfeilern dieser Bauart realisiert: Bouble, Bellon, Sioule und das Viaduc de Neuvial. Die Neuerung bestand in der Reduktion der Standrohre auf nur 4 Stück, die jetzt bei einem Außendurchmesser von 50 cm in Längen von 5 m gegossen werden konnten; die Wandstärke reduzierte sich von 45 mm auf 30 mm in den Höhenlagen. Die zweite Neuerung bestand darin, den Fuß der rechteckigen Gitterkonstruktion in Querrichtung zur Brückenfahrbahn mit gekrümmten Gussrohren gegen seitliches Kippen zu sichern. Dies führte zu einer schlankeren Bauweise, die auf eine Zugvorspannung durch innenliegende Zuelemente, wie bei den Vorgängerbauten üblich, verzichten konnte. In (Abb. VII. 33) erkennt man, dass die Standrohre bei den höheren Pfeilern gerade bis zur Fundamentierung durchlaufen, und dass die Verstärkungsstreben sich seitlich anschmiegen. Bei den niedrigeren Pfeilern läuft das schräge Standrohr direkt in einer Kurve aus (Abb. VII. 33, Fig. 14). Diese Kurve wird durch eine

Parabel dritten Grades gebildet, um den Übergang zur Geraden, respektive ihrer Tangente zu harmonisieren.⁵⁹

Die Rohre waren untereinander durch verschraubte Flanschen zugfest miteinander verbunden und der Hohlraum mit Beton vergossen, was die Schwingungsanfälligkeit, die Korrosion und die gefürchtete Eissprengung durch Stagnationswasser verhinderte sollte.

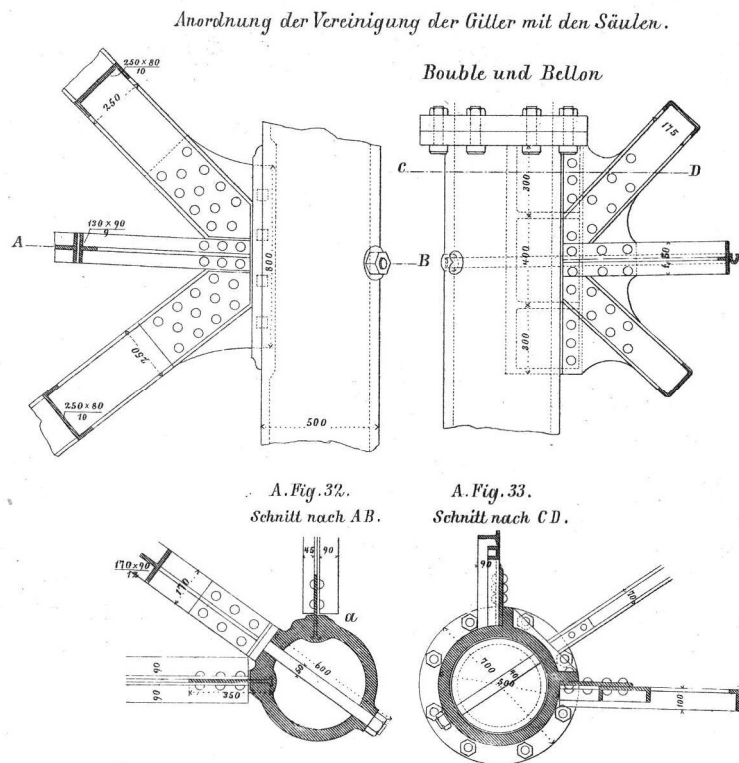


Abb. VII. 34: Knotenpunktdetail Gussrohr mit schmiedeeisernen Verbänden, Viaduc de Bouhle und Bellon, 1869

Die Gussrohre waren in ihrem Querschnitt und den Flanschen zur Aufnahme der Verbände lokal verstärkt und mit Montagelöchern für Verschraubungen (Abb. VII. 34) versehen, sodass es sich nicht mehr um Leitungsrohre handelte, die einfach umgewidmet wurden.

In der Abb. VII. 34, Fig. 33 wird das schmiedeeiserne Winkelprofil durch Nietung mit dem Gusseisen verbunden, was als problematisch erkannt wurde, da durch Setzen des Niets das Gusseisen zerspringen konnte. Der am Projekt beteiligte junge Gustav Eiffel (1832-1923) schlug dagegen ein anderes Verfahren vor: In der Fig. 32 ist zu sehen, dass beim Gießvorgang des Gussrohres Fahnenbleche aus Schmiedeeisen mit eingegossen wurden, an die durch Nietung problemlos angeschlossen werden konnte.⁶⁰ Die einfache Gussäule hatte sich zum

⁵⁹ Siehe: Nördling: Metall Viadukte, 1874, S. 75

⁶⁰ Siehe: Nördling: Metall Viadukte, 1874, S. 75

Tragwerkselement in komplexeren Tragwerksstrukturen gewandelt und wurde arbeitsteilig, mit dem Schmiedeeisen als Zuelement, für Druckstäbe bis weit in die 1890er Jahre angewendet. Aus dem unterschiedlichen Werkstoffverhalten von Guss- und Schmiedeeisen ergaben sich Fragen der Detailausführung für kraftschlüssige und materialgerechte Verbindungen.

7.11 Aussichtsturm Büchenbronner Höhe

Mit der Gründungswelle von Heimat- und Wandervereinen im jungen deutschen Kaiserreich entstand ein neuer Markt für Aussichtstürme an landschaftlich entlegenen Punkten, die sich ästhetisch an historisierende Baustile orientieren sollten – sich aber häufig aus Kostengründen nur durch sparsame Eisengitterkonstruktionen realisieren ließen.⁶¹

Immo Boyken berichtet in seinem Artikel über vorgefertigte Aussichtstürme⁶² von der Dresdner Firma Louis Kühne, die aus dem Leitungsbau kommend, den Markt für vorgefertigte Aussichtstürme bediente und mit dem *Eisernen Aussichtsturm bei Pforzheim*⁶³ von 1883 sich einen Namen machte. Der Turm auf der Büchenbronner Höhe bei Pforzheim (Abb. VII. 36) wurde ein Jahr nach seiner Fertigstellung in der Deutschen Bauzeitung⁶⁴ ausführlich besprochen, da seine Formgebung und Detaillierung von den bekannten Gitterkonstruktionen der Leuchttürme und der Gitterpfeiler der Viadukte abwichen.

Das Haupttragwerk wurde, nach Aussage des Artikels, hier zum ersten Mal von duktilen, schmiedeeisernen Rohren gebildet, wohingegen die innere Erschließungsstruktur aus konventionellen Gussrohren besteht. Es handelt sich in gewisser Weise um eine Invertierung der Wahl der konstruktiven Elemente gegenüber den zuvor geschilderten Pfeilern für die Viadukte. Das Gusseisen übernimmt nur noch eine verbindende Rolle in Gestalt von Klemmmuffen (Abb. VII. 35) für die schlanken, gekrümmten Standrohre aus Schmiedeeisen. Die Krümmung, bei den Viadukten aus den Überlegungen zur Standsicherung entwickelt, findet sich hier in das Gestaltungskonzept harmonisch integriert wieder.

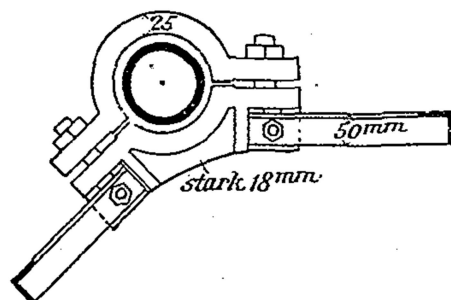


Abb. VII. 35: Gusseiserner Knotenpunkt der schmiedeeisernen Rohrstände, Büchenbronner Höhe, 1883

⁶¹ Siehe: Burkhardt: *Eiserne Rohrkonstruktionen*, 1991 u. Boyken: *Gestaltetes Eisen*, 1988

⁶² Boyken: *Vorgefertigte Aussichtstürme*, 1991

⁶³ o.A.: *Eiserner Aussichtsturm*, 1885, S. 541

⁶⁴ Siehe: o.A.: *Eiserner Aussichtsturm*, 1885, S. 541f

Im Artikel der Deutschen Bauzeitung heißt es dazu:

*„Der Thurm ist im Grundriss 8eckig, seine Ständer sind nach unten ausgeschweift, wozu wir bemerken, dass die von ihnen gebildete Linie nicht polygonal, sondern gekrümmt ist. Diese Ständer bestehen aus galvanisierten schmiedeeisernen Röhren [...]“*⁶⁵

Boyken nennt einen Stich von 2,5 cm im Mittel auf 5 m Rohrlänge⁶⁶, die zu einer harmonischen Krümmung von der 8,5 m breiten Basis hinauf zur 24,75 m hohen Plattform mit ihrem 2 m breiten Turmschaft führt.

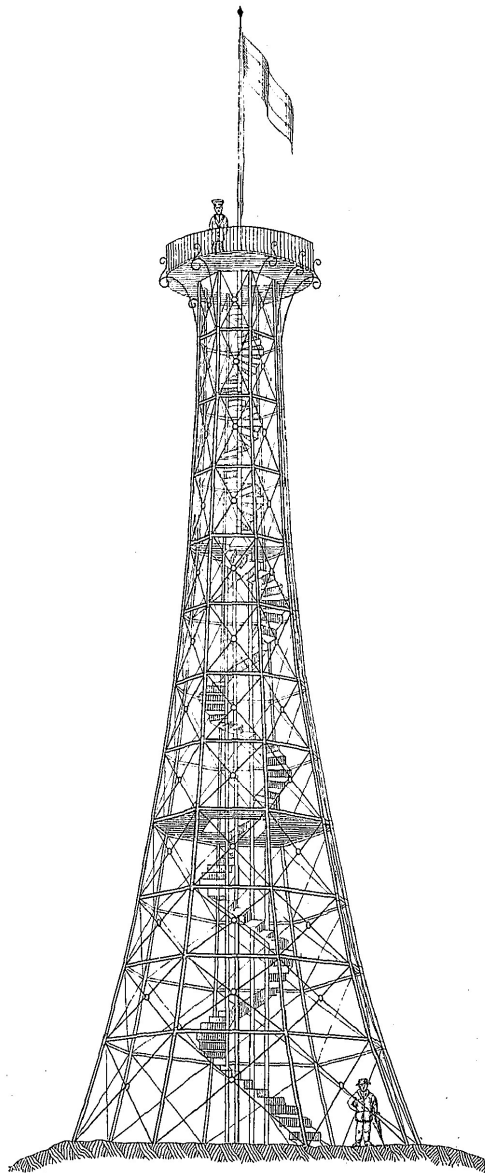


Abb. VII. 36: Aussichtsturm der Fa. Louis Kühne auf der Büchenbronner Höhe bei Pforzheim, 1883

⁶⁵ o.A.: Eiserner Aussichtsturm, 1885, S. 541

⁶⁶ Siehe: Boyken: Vorgefertigte Aussichtstürme, 1991, S. 138

Die gesamte Konstruktion weist eine starke Differenzierung der tragenden und aussteifenden Bauteile auf, die mit zunehmender Höhe abnehmende Quermesser annehmen. Gemäß der Baubeschreibung in der Deutschen Bauzeitung wird das 8-eckige äußere Traggerüst aus galvanisierten, schmiedeeisernen Rohren gebildet, die im unteren Bereich einen Durchmesser von ca. 75 mm haben, im Mittelteil 70 mm und im letzten Abschnitt nur noch 60 mm betragen – eine Aussage zu den Wandstärken wird hier nicht getroffen; genauso wenig wie über die Herkunft der Rohre, die Art der Formgebung des Sticks: Durch plastisches Biegen oder weniger wahrscheinlich durch elastische Vorspannung mit Hilfe der horizontalen Verbände.

Die Verbindung der Ständerrohre untereinander und mit den Verbänden erfolgt über aufgeschraubte, gusseiserne Muffen mit Anschlusspunkten für die Verbände aus L-Winkeln.

Die schmiedeeisernen Rohre werden mit ihren glatten Enden durch den Klemmdruck der Muffe gehalten, was der Autor des zeitgenössischen Artikels kritisch anmerkte, da stets ein Nachspannen dieser Verbindungen notwendig werden würde.⁶⁷

Gegenüber den konstanten Abmessungen der horizontalen L-Winkel, sind die Auskreuzungen aus Rundstahl mit aufgeschnittenen Gewinden mit zunehmender Höhe im Durchmesser abnehmend: Von 16 mm im 1. Stock, 15 mm im 2. Stock auf 13 mm im 3. Stock.

Für die Erschließung des Turmes wurde eine gusseiserne Wendeltreppe gewählt, die von vier, im Quadrat stehenden, Gussstützen bis zum 8. Horizontalverband getragen wird. Auf eine Differenzierung der Durchmesser wurde bei dieser konventionellen Bauart verzichtet. Die senkrecht stehenden Gussstützen von ca. 120 mm Durchmesser bei 4 m Länge sind über Flanschen mit Aussteifungsrippen verschraubt. Das letzte Drittel des sich verengenden Turmschaftes wird von einer Spindeltreppe mit wiederum einer gusseisernen Stütze als Spindel getragen.

Neben den konstruktiven Details und der Hervorhebung der Verwendung von gekrümmten, schmiedeeisernen Rohren, ist es das Konstruktionsgewicht von nur 480 kg pro Höhenmeter und einem Preis von 6000 Mark, die positiv hervorstechen. Als Minderung dieser Leistungsbilanz wird die mangelhafte Steifigkeit von Zeitgenossen bemängelt. Danach konnte der Aufstieg von schon einer Person das Bauwerk in spürbare Schwingung versetzen, was angesichts der Klemmverbindungen kritisch gesehen wurde und durch nachträgliche Seilverspannungen⁶⁸ in den 1970er Jahren gelöst wurde.

Zu 70:

Es ist anzumerken, dass Käpplein im seinem publizierten Sachstandsbericht⁷⁰ über den baulichen Zustand der überkommenden Originalteile eine explizite Zuordnung der im historischen Bericht genannten *galvanisierten schmiedeeisernen Rohre* unterlässt, aber dieser Darstellung des historischen Artikels auch nicht widerspricht. Die Außendurchmesser der Rohre werden von ihm bestätigt, die Wandstärken mit 4,2–4,3 mm angegeben, ohne eine Schweißnaht zu erwähnen. Da mit der Fertigstellung des Turmes vor dem Produktionsbeginn der nahtlosen Rohre nach dem Mannesmann-Verfahren nur geschweißte Rohre für einfache Leitungen bzw. höherwertige für Siederohre zur Verfügung standen, ist es nicht unerheblich, hier eine klare Zuordnung vorzunehmen, da ein Abgleich z.B. mit den Lieferprogrammen des zeitgenössischen Marktführers Poensgen aus Düsseldorf ggf. möglich wäre. Der Fa. Louis Kühne wird zurecht eine hohe Kompetenz in der Verarbeitung von Rohren aller Art zugesprochen – eine eigene Produktionslinie für Schweißrohre wäre aber ungewöhnlich.

⁶⁷ o.A.: Eiserner Aussichtsturm, 1885, S. 542

⁶⁸ Siehe: Boyken: Vorgefertigte Aussichtstürme, 1991, S. 136

Mit den Bemühungen für die Erhaltung historisch bedeutsamer Bauwerke, des gleichnamigen Sonderforschungsbereiches 315, ist dieser exzeptionelle Turmbau, am Vorabend zur Erfindung des nahtlosen Stahlrohres, umfassend von verschiedenen Autoren, hier namentlich neben Immo Boyken, zu nennen Berthold Burkhardt⁶⁹ und Rudolf Käpplein⁷⁰, bautechnikgeschichtlich eingeordnet und in seiner Substanz erforscht worden.

⁶⁹ Siehe: Burkhardt: Eiserne Rohrkonstruktionen, 1991

⁷⁰ Siehe: Käpplein: Aussichtsturm Büchenbronner Höhe, 1988

Abbildungen Kapitel 7:

- Abb. VII.1: Fig. 1-7 oben, Biegemaschine für Blechrohre, Johann Jordan, Biedermeierzeit. Aus: Ritter von Precht, Johann: Technologische Encyklopedie oder alphabetisches Handbuch der Technologie, der technischen Chemie und des Maschinenwesens, Stuttgart, Cotta'sche Buchhandlung, 1842, Band XII, Tafel 259
- Abb. VII.2: Selbsttragende Wasserleitung mit 3,12m Durchmesser. Aus: Merkblatt 313 Rohrleitungs- und Energiebrücken, Beratungsstelle für Stahlverwendung 1972, S. 4 Bildausschnitt
- Abb. VII.3: Evolution und Leistung der Hominiden nach Karl Albert Tietze. Aus: Tietze, Karl Albert: Vom Blasrohr bis zur Kontinental-Pipeline, In: Frontinus Heft X, S. 12
- Abb. VII.4: Ausführung römischer Bleirohre nach Gockel. Aus: Gockel, B.: Bilddokumente, In: Wasserversorgung im antiken Rom, München u. Wien 1983 im Frontinus-Heft XIV, S. 169
- Abb. VII.5: Oben Muffenrohr Schloss Dillenburg 1455, unten Flanschenrohr Schloss Versailles 1686. Aus: Tietze, Karl Albert: Vom Blasrohr bis zur Kontinental-Pipeline, Frontinus Heft XX, S. 23
- Abb. VII.6: Versuchsröhre der Conway- und Britannia-Röhrenbrücke von Stephenson. Aus: o.A.: Die Röhrenbrücke bei Conway und über die Menai-straits auf der Chester-holyhead-Eisenbahn in England. In: Allgemeine Bauzeitung, Hrsg. L. Förster, 14. Jg., 1849, S. 183
- Abb. VII.7: Fig. 5 Versuchsröhre mit elliptischem Querschnitt im Obergurt der Conway- und Britannia-Röhrenbrücke von Stephenson, 1840er Jahre. Aus: o.A.: Die Röhrenbrücke bei Conway und über die Menai-straits auf der Chester-holyhead-Eisenbahn in England. In: Allgemeine Bauzeitung, Hrsg. L. Förster, 14. Jg., 1849, Blatt 278
- Abb. VII.8: Railway Tubular Suspension Bridge von Isambard Kingdom Brunel, 1852. Aus: o.A.: Railway Tubular Suspension Bridge. In: Taylor's Illustrated Guide to the Banks of the Wye, London 1857, S. 24
- Abb. VII.9: Erhaltener Querschnitt der Tragröhre mit Diaphragma von Isambard Kingdom Brunel, 1852. Aus: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Surviving_girder_section,_Chepstow_railway_bridge.jpg Description: Surviving section of one of the horizontal girders of Chepstow Railway Bridge, now preserved outside the offices of the adjacent Mabe bridge works. Date 10 March 2012, Source Own work, Author Andy Dingley
- Abb. VII.10: Längsansicht der Hauptöffnung der Royal Albert Bridge von Isambard Kingdom Brunel, 1852. Aus: o.A.: Die Brücke von Saltash in der Bai von Plymouth. In: Allgemeine Bauzeitung, Hrsg. L. Förster, 22. Jg., 1857, Blatt 117 Ausschnitt
- Abb. VII.11: Querschnitt der Tragröhre der Royal Albert Bridge von Isambard Kingdom Brunel, 1852. Aus: o.A.: Die Brücke von Saltash in der Bai von Plymouth. In: Allgemeine Bauzeitung, Hrsg. L. Förster, 22. Jg., 1857, Blatt 118 Ausschnitt
- Abb. VII.12: Gaunless-Bridge von George Stephenson und Sohn Robert, 1824. Aus: Tomlinson, William Weaver, 1858-1916 (1915) The North Eastern Railway; its rise and development, S. 107
- Abb. VII.13: Assemblierte Rohre aus genieteten Blechen, Firth of Forth Bridge 1882-90. Aus: Sammlung Burkhardt, Bild #6
- Abb. VII.14: Querschnitt der Tragröhre mit inneren Verstärkungsrippen und Diaphragma der Firth of Forth Bridge, 1890. Aus: o.A.: Die Forth-Brücke bei Queensferry. In: Allgemeine Bauzeitung, Hrsg. L. Förster, 55. Jg., 1890, Blatt 64, Ausschnitt
- Abb. VII.15: Auflagerdetail der Firth of Forth Bridge mit innerer Versteifung, 1890. Aus: o.A.: Die Forth-Brücke bei Queensferry. In: Allgemeine Bauzeitung, Hrsg. L. Förster, 55. Jg., 1890, Blatt 65, Ausschnitt

- Abb. VII.16: Covesea Beacon von Alan Stevenson (1807-1865), ca. 1820er Jahre. Aus: Lewis, Miles: Iron Lighthouses. In: Construction History : International Journal of the Construction History Society. Vol. 27, CHS, 2012, S. 25
- Abb. VII.17: Leuchtturm bei Sand Key, Süd Florida, von I.W.P. Lewis und John Walker 1851-1853. Aus: Lewis, Miles: Iron Lighthouses. In: Construction History : International Journal of the Construction History Society. Vol. 27, CHS, 2012, S. 30
- Abb. VII.18: Bezogene Preise für Roheisen in England und Schottland nach Werner u. Seidel. Aus: Werner, Frank u. Seidel, Joachim: Der Eisenbau : Vom Werdegang einer Bauweise. Verl. für Bauwesen, Berlin, 1992, S. 29
- Abb. VII.19: Walzprofilsortiment um 1920 mit Quadrant-Eisen, Mitte links. Aus: Werner, Frank u. Seidel, Joachim: Der Eisenbau : Vom Werdegang einer Bauweise. Verlag für Bauwesen, Berlin, 1992, S. 134
- Abb. VII.20: Genormte Quadrant-Eisen im deutschsprachigen Raum. Aus: Hrg. Heinzerling, Friedrich u. Intze, Otto: Deutsches Normalprofil-Buch für Walzeisen zu Bau- und Schiffbau-Zwecken. La Ruelle, Aachen 1920, S. 29
- Abb. VII.21: Zusammengesetzter Röhrenquerschnitt mit variabler Wandstärke des Centennial Towers. Aus: o.A.: Scientific American a Weekly Journal of Practical Information, Art, Science, Mechanics, Chemistry, and Manufactures. Vol. XXX, N° 4, 24. January 1874, S. 50
- Abb. VII.22: Höhenvergleich des Centennial Towers, nicht ausgeführt, Philadelphia 1874. Aus: o.A.: Scientific American a Weekly Journal of Practical Information, Art, Science, Mechanics, Chemistry, and Manufactures. Vol. XXX, N° 4, 24. January 1874, Titelblatt
- Abb. VII.23: Bohrrapparat zum Kalibrieren von gegossenen Kanonenrohren, Frankreich 18. Jhd. Aus: Diderots Enzyklopädie; Die Bildtafeln; 1762-1777; Weltbild Verlag, genehmigte Lizenzausgabe; Augsburg 1995; copyright by Arnoldo Mondadori, Mailand; copyright der deutschen Ausgabe by Südwest Verlag GmbH & Co. KG, München; Tafel 1125
- Abb. VII.24: Bohrköpfe zum Kalibrieren von gegossenen Kanonenrohren, Frankreich 18. Jhd. Aus: Diderots Enzyklopädie; Die Bildtafeln; 1762-1777; Weltbild Verlag, genehmigte Lizenzausgabe; Augsburg 1995; copyright by Arnoldo Mondadori, Mailand; copyright der deutschen Ausgabe by Südwest Verl. GmbH & Co. KG, München; Tafel 1126
- Abb. VII.25: Delhi iron Pillar, massive schmiedeeiserne Säule, ca. 400 n.Chr. Aus: Sujit Kumar, 2007, CC BY-SA 3.0, File: Iron Pillar, Delhi.jpg, Created: 17 September 2007, https://en.wikipedia.org/wiki/Iron_pillar_of_Delhi#/media/File:Iron_Pillar,_Delhi.jpg
- Abb. VII.26: Mundloch des Herzog-Alexius-Erbstollen in Mädesprung mit gusseisernem klassizistischen Säulenportikus, 1830. Aus: <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/58/Herzog-Alexius-Erbstollen.jpg>; By Olaf Meister (Own work) [CC BY-SA 4.0 (<http://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>)], via Wikimedia Commons
- Abb. VII.27: Standardknoten der Benyon and Bage Flax Mill in Leeds, ca. 1804. Aus: Bannister, Turpin: The First Iron-Framed Buildings. In: The Architectural Review, Vol. 107, N° 639, March 1950, S. 243
- Abb. VII.28: Standardknoten zur Verbindung der gusseisernen Hohlstütze und dem schmiedeeisernen Fachwerkträger, Cristal Palace, 1851. Aus: Betschart, Anton-Peter: Neue Gusskonstruktionen in der Architektur : Giessen + Bauen 1. Hrsg.: Entwicklungsinstitut für Giesserei- u. Bautechnik, 1985, S. 19
- Abb. VII.29: Zusammengesetzte Gussstütze mit Flanschen, erste Hälfte 18. Jhd. England. Aus: Betschart, Anton-Peter: Neue Gusskonstruktionen in der Architektur : Giessen + Bauen 1. Entwicklungsinstitut für Giesserei- und Bautechnik, 1985, S. 15

- Abb. VII.30: System Wiebeking mit geschweiften Röhren, Ausschnitt, 1830er Jahre. Aus: Müller, Hinrich: Die Erbauung der eisernen Brücken. In: Die Brückenbaukunde in ihrem ganzen Umfange : Ein Handbuch für Ingenieure und Baumeister. Romberg, Leipzig, 1850-54, Kapitel Röhrenbrücken von Gußeisen, 1850, Tafel 81
- Abb. VII.31: System Reichenbach mit formschlüssigen Flanschen, 1830er. Aus: Der Brückenbau in seinem ganzen Umfange. Bd. 2 des Handbuches der Ingenieurwissenschaften. Zweite verm. und verbess. Aufl., Verlagsbuchhandlung Carl Macken, Stuttgart, 1858, Tafel XIX aus Werner, Ernst: Die ersten eisernen Brücken (1777-1859). Von der Fakultät für Bauwesen der TU München, Tag der Promotion 30.07.1974, S. 393
- Abb. VII.32: Röhrenbrücke über den Hammerstrom bei Peitz, 1829. Aus: Landesarchiv Nordrhein-Westfalen, Abt. Westfalen, Kartensammlung A, Nr. 16538, Peitz (Peitz) - Röhrenbrücke über den Hammer-Strom - Grundriß, Schnitt, Ansicht, Details - 1832 - 1 Fuß = 5,3 cm; 3 Fuß = 8, cm; 30 Fuß = 11,3 cm - 24 x 61 - Druck: Prêtre - gez.: Schwenger; G. Büttner - gestochen: C. Mare - Regierung Arnsberg
- Abb. VII.33: Gegenüberstellung der Pfeiler aus Gussrohren, Viaduct de Bouble Fig. 3 und Viaduc Neuval Fig. 14, 1868. Aus: o.A.: Die Metall-Viadukte der Linie Comentry-Ganat von M. W. Nördling. In: Allgemeine Bauzeitung, Hrsg. L. Förster, 1874, 33Jg., Bl. 95 u. 96, Ausschnitt
- Abb. VII.34: Knotenpunktdetail Gussrohr mit schmiedeeisernen Verbänden, Viaduc de Bouble und Bellon, 1869. Aus: o.A.: Die Metall-Viadukte der Linie Comentry-Ganat von M. W. Nördling. In: Allgemeine Bauzeitung, Hrsg. L. Förster, 1874, 33Jg., Bl. 97, Ausschnitt
- Abb. VII.35: Gusseiserner Knotenpunkt der schmiedeeisernen Rohrstände, Büchenbronner Höhe, 1883. Aus: o.A.: Eiserner Aussichtsturm bei Pforzheim. In: Deutsche Bauzeitung : Verkündungsblatt des Verbandes Deutscher Architekten- und Ingenieursvereine, Jg. 19, N° 90, S. 541-542, Berlin, 1885, S. 542
- Abb. VII.36: Aussichtsturm der Fa. Louis Kühne auf der Büchenbronner Höhe bei Pforzheim, 1883. Aus: o.A.: Eiserner Aussichtsturm bei Pforzheim. In: Deutsche Bauzeitung : Verkündungsblatt des Verbandes Deutscher Architekten- und Ingenieursvereine, Jg. 19, N° 90, S. 541-542, Berlin, 1885, S. 541

8.0 Über die besondere Eignung hohler Stäbe aus Eisenwerkstoffen

Im Kapitel 7 über die Entwicklungsgeschichte von Rohren und Hohlprofilen wurden die technischen Voraussetzungen, beziehungsweise die Ursprünge der kreisrunden Konstruktionselemente aus Metallwerkstoffen aufgezeigt und ihre Adaption für die ersten tragenden Konstruktionen als Stützen oder Biegeträger an ausgesuchten Beispielbauten verdeutlicht. Die publizierten und latenten Argumente zur Hervorhebung ihrer besonderen Eignung, sind einer eigenen Betrachtung zu unterziehen. Der Vergleich wird zunächst für die Frühphase mit stabförmigen Tragstrukturelementen anderer Materialität und Gestaltform geführt, und ab ihrer Etablierung innerhalb der Walzprofile.

Die Frage nach einer Eignung kann nur befriedigend beantwortet werden, wenn ein Ziel klar formulierbar ist. Erst mit der Zielsetzung ergeben sich die qualitativen und quantitativen Kriterien einer Bewertung, die eine Vergleichbarkeit mit Alternativen ermöglicht oder einen Komplementär indiziert. In diesem Sinne sind Biegeträger und Stützen zu unterscheiden, da erstere Zielsetzung im Überspannen und letztere in der Stützung liegen. Präziser wird diese Abgrenzung, wenn die Stütze als Pendelstab, frei von Biegung und Torsion, als reiner Druckstab abgegrenzt wird.

8.1 Die Stütze

Die Druckkraftübertragung zwischen zwei senkrecht übereinanderstehenden Punkten mit der relevanten Höhendifferenz h ist bautechnikgeschichtlich eine sehr alte Problemstellung, die ihre Bewältigung in einer der ältesten Familie von Konstruktionsformen fand: Stützen, Säulen, Pfosten, Pfeiler und Ständer sind hierfür beispielhafte Vertreter aus den verschiedenen Werkstoffen und Bauformen. Ihnen ist gemein, dass eine relevante Druckkraft lotrecht in den Baugrund oder anschließende Bauteile abgeführt werden soll, in Abgrenzung zu den Streben. Damit ist die punktuelle Stützung eine tradierte Zielsetzung, die in Alternativen gedacht wurde. Die Kriterien zur Auswahl innerhalb der historischen Alternativen Holz- und Steinbau können hier an dieser Stelle nur unvollständig wiedergegeben werden, da sie einen gesamtulturellen Entscheidungsprozess betrafen. Praktische Aspekte, wie regionale Verfügbarkeit, Dauerhaftigkeit, Brandschutzsicherheit und Bearbeitbarkeit stehen den soziokulturellen Aspekten der Angemessenheit für profane wie sakrale Bauwerke gegenüber, sodass sich diese Abwägungsprozesse mit dem Begriff von Baukulturen fassen lassen.

8.2 Vorteile der historischen Gussstützen

Der historische Kontext aus 8.1 ist zu vergegenwärtigen, da somit eine vielschichtige Einordnung der Gussstützen in eine bekannte Zielsetzung möglich wird, die die Vielzahl möglicher Kriterien zur Benennung ihrer Eignung offenlegen, wie es im Kapitel über die Entwicklungslinien bereits geschah. An dieser Stelle wird nochmals zusammengefasst:

- 1.) Nichtbrennbarkeit bei geringem Konstruktionsraum gegenüber der traditionellen Holz- und Steinbaukonstruktion in den englischen cotton mills im 18. Jahrhundert
- 2.) Geringer Konstruktionsraum auch bei hohen Lasten, z.B. aus dem Geschossbau oder Brückenbauwerke
- 3.) Duale Nutzung bei hohlem Querschnitt: Tragen und Leiten für die Gasbeleuchtung oder Abführung des Regenwassers innerhalb von Gussstützen
- 4.) Zierformen konnten einfach im Gussvorgang berücksichtigt werden, um den stilistisch geprägten Sehgewohnheiten zu entsprechen
- 5.) Gusseisen stand mit der industriellen Revolution in relevanten Mengen zur Verfügung
- 6.) Schnelle Montagezeiten

8.2.1 Die Materialfestigkeit von Gusseisen im Vergleich

Der zweite Aspekt war in der Materialfestigkeit selbst schon herausstechend angelegt und führte schon Hodgkinson zu seinen Versuchsreihen, in denen er die Grenzen des Materials und möglicher Strukturformen für Druckstäbe untersuchte – mit dem Ziel eine Bemessungsformel zu finden, die beides, Materialqualität und Strukturform, berücksichtigte. Er sah wohl die Eignung von Gussstützen generell für Druckstäbe so hoch angesiedelt, dass er auf einen Vergleich mit traditionellen Stützkonstruktionen verzichtete.

Diese zutreffende Annahme hätte sich schon zu Hodgkinsons Zeiten methodisch in zwei Schritten belegen lassen, da folgende Kriterien für Stützen den Konstrukteur damals leiteten:

- i) Konstruktionsraum
- ii) Materialkosten
- iii) Steifigkeit
- iv) Konstruktionsgewicht

In einem ersten Schritt kann man die Leistungsfähigkeit des Werkstoffes unabhängig seiner Gestaltform ermitteln (Tabelle VIII. 1). Für eine gegebene Druckkraft z. B. 100 kN, die gerade noch im Gleichgewicht mit der Bruchspannung stehen soll, kann man für ein Prisma mit der Höhe 1 cm aus der Dichte (ρ) und der Bruchfestigkeit (σ_{Bruch}) eines

Anm.:

Siehe hierzu Kapitel 5.6
Von der Vorstellung der
Schlankheit bei Hodgkin-
son.

Werkstoffes den notwendigen Konstruktionsraum (V), das Konstruktionsgewicht (G) und ggf. die Materialkosten bestimmen.

Tabelle VIII. 1: Volumen und Gewicht eines Druckprismas von 1 cm Höhe bei $F=100\text{kN}$

Zu Tabelle VIII. 1:

Die Werte in der Tabelle geben durchschnittliche Werte wieder, das Gusseisen ist hier Low Moore N° 3, übrige Werte nach Schneider Bautabellen für Architekten. Schneider: Bautabellen für Architekten, 1996, S. 13.72ff
Holz, parallel zur Faser belastet, profitiert auf der

Werkstoff	$\rho \left[\frac{g}{cm^3} \right]$	$\sigma_{Bruch} \left[\frac{kN}{cm^2} \right]$	$V [cm^3]$ $h=const.$	$G [g]$
Gusseisen	7,2	77,1	1,3	9,36
Fichte	0,47	$(\sigma_{\parallel})4,0$	25	11,75
Klinker	2,0	5,0	20	40
Kalkstein	2,5	13	7,7	19,25

Gusseisen benötigt danach nur 5,2% des Konstruktionsraumes gegenüber Fichtenholz (Tabelle VIII. 1).

Die Steifigkeit konnte nach Thomas Young (1773-1829) durch die Elastizität beschrieben werden, die die Einheit einer Spannung hat. Für die Betrachtung des Prismas geringer Abmessungen war sie kaum aussagekräftig. Erst mit zunehmender Schlankheit eines Druckstabes wird sie als Materialeigenschaft, neben der Spannung, relevant.

8.2.2 Die Gestaltform des Kreisrings bei hohlen Gussstützen

Im zweiten Schritt wird man den Aspekt der Gestaltform berücksichtigen, wobei die Gestaltform selbst mit dem kreisringförmigen Querschnitt als Optimum festgelegt wird, da so ein maximaler Trägheitsradius zu erzielen ist. Die Werkstoffwahl muss in dieser Konsequenz zwei Punkte erfüllen:

- a) hohes E-Modul
- b) Formbarkeit vor 1885; eine strukturelle Eigenschaft des Werkstoffes, die es erlaubt, ihn kraftschlüssig in der günstigen Kreisringform anzuordnen – Stand der Technik vor 1885

Tabelle VIII. 2: E-Modul und Formbarkeit im Sinne des Kreisringes verschiedener historischer Werkstoffe vor 1885

Zu Tabelle VIII. 2:

Die Werte der Tabelle aus: Schneider: Bautabellen für Architekten, 1996, S. 13.72ff

*Der höhere Wert ist so bei Bargmann in Tabelle 1.7 zu finden. Aus: Bargmann: Historische Bautabellen, 2013, S. 246

Werkstoff:	E-Modul $\left[\frac{N}{mm^2} \right]$	Formbarkeit vor 1885
Schmiedeeisen	210.000-220.000*	bedingt
Gusseisen	78.-123.000	gegeben
Fichte	10.000	bedingt
Klinker	20.-70.000	nein
Kalkstein	40.-70.000	nein

Das Gusseisen erfüllt beide Kriterien in uneingeschränkter Weise (Tabelle VIII. 2) und ist in der Frühzeit dem Werkstoff Schmiedeeisen/Puddeleisen in seiner Verarbeitbarkeit zu Röhrenform noch überlegen.

Es kann zunächst festgehalten werden, dass wie im Kapitel 7 über die Entwicklungslinien kurz dargelegt, der kreisringförmige Querschnitt in der europäischen Bautechnikgeschichte lange Zeit keine Anwendung zur planmäßigen Aufnahme von Druck, Zug oder Biegung fand, im Gegensatz zu den Bambuskonstruktionen in Asien.

Die vorherrschenden Baumaterialien, wie Erden, gebrannte oder natürliche Steine und Holz dominierten das Bauwesen in Europa. Nur der Holzpfeiler bzw. -stab mit seinen handwerklichen Anschlussdetails entsprach noch am ehesten einem Stabtragwerkelement im heutigen Sinne. Er kann daher als ein Vorläufer dieser Modellvorstellung gelten. Eine Optimierung konnte aber nicht durch den geometrisch vorteilhaften Kreisringquerschnitt erfolgen.

Die hölzernen Teufel oder Pipen zur Trinkwasserversorgung wiesen eine Formähnlichkeit zu späteren hohlen Gussstützen auf, waren aber aus praktischen Gründen nicht als Druckstäbe anwendbar. Sowohl das aufwendige Aufbohren der Stämme als auch das unvermeidliche Aufreißen der Zylinderschale entlang der Längsachse bei nicht erdfeuchter Lagerung standen auf der praktischen Seite dagegen, und ein tradiertes Verständnis von konstruktiv notwendiger Massivität zur Herausbildung von Anschlüssen wie Zapfenlöchern und Sassen wirkte zusätzlich limitierend. Erst in moderner Holzleimbauweise lassen sich hohle Druckstäbe realisieren.

8.3 Galileis Erkenntnis über den Gestalteinfluss

Vor diesem Hintergrund sind die gedanklichen Biegeversuche von Galileo Galilei (1564-1642) an Rohren (Abb. VIII. 1) besonders bemerkenswert, da hier der wirksame Gestalteinfluss herausgestellt wurde. Auch wenn Galilei seine Aussagen an Kragträgern festmachte, war der Transfer seines Ansatzes für schlanke Druckstäbe naheliegend.

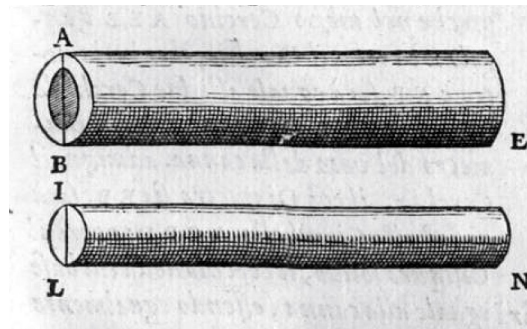


Abb. VIII. 1: Vergleich von Kragträgern gleicher Masse und Länge bei Galilei mit $F_E \gg F_N$, 1638

Zu ¹:

Die deutsche Übersetzung nach v. Oettingen:

„Zum Schluss der heutigen Erläuterungen will ich einiges über den Widerstand der hohlen festen Körper hinzufügen, deren sich die Kunst und die Natur in tausend Fällen bedient; hier wird ohne Gewichtsvermehrung die Festigkeit bedeutend gesteigert: so z. B. bei den Knochen der Vögel und bei vielen Rohren, die leicht sind und doch sehr biege- und bruchfest: so dass, wenn ein Strohalm, der eine Aehre trägt, die schwerer ist als der ganze Halm, aus derselben Masse bestünde aber massiv wäre, er viel weniger biege- und bruchfest sein würde. So hat man künstlich beobachtet und durch den Versuch bestätigt, dass eine hohle Lanze oder ein Rohr aus Holz oder Metall viel fester ist, als wenn diese Körper bei gleichem Gewicht und gleicher Länge massiv wären, wobei sie feiner und dünner sein müssten; daher erfand man das Aushöhlen der Lanzen, um sie fest und zugleich leicht zu machen. Wir wollen folgenden Satz beweisen: Die Widerstände zweier Cylinder von gleicher Masse und Länge, deren einer hohl, der andere massiv sei, verhalten sich zueinander, wie die Durchmesser.“

Oettingen v.: Unterredung und Mathematische Demonstration, 1890, S. 123f

Galileis Ansatz bestand zunächst in der Ermittlung der Zugfestigkeiten von verschiedenen Materialien, um diese Widerstände mit Hilfe von Annahmen innerer Hebel auf Biegeversuche zu übertragen, ohne den Begriff der Spannung im Allgemeinen oder den der Biegezugspannung im Speziellen zu kennen. Dennoch machte Galilei erste quantifizierbare Aussagen zur Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Gestaltformen eines biegezugfesten Werkstoffes bei gleichem Masseinsatz in einem identischen statischen System. Am Ende des zweiten Tages in den Dialogen des *Discorsi*¹ dazu heißt es:

„Solo per ora ultimo termine de gli hodierni ragionamenti voglio aggiugnere la specolazione delle resistenze de i solidi vacui, de i quali l'arte, e più la natura si serve in mille operazioni; dove senza crescer peso si cresce grandemente la robustezza: come si vede nell' ossa de gli uccelli, & in moltissime canne, che son leggiere, e molto resistenti al piegarsi, e rompersi. che se un fil di paglia, che sostien una spiga più grave di tutto'l gambo, fusse fatto della medesima quantità di materia, mà fusse massiccio, sarebbe assai meno resistente al piegarsi, & al rompersi. E con talragione hà osservato l'arte, e confermato l'esperienza, che un hasta vota, ò una canna di legno, ò di metallo, è molto più salda, che se fusse d'altrettanto peso, e della medesima lunghezza massiccia, che in conseguenza sarebbe più sottile, e della medesima lunghezza massiccia, che in conseguenza sarebbe più sottile, e però l'arte hà trovato di far vote dentro le lancie, quando si desidera haverle gagliarde, e leggiere. Mostreremo per tanto, come Le resistenze die due Cilindri eguali,

¹ Galilei: *Discorsi*, 1638, S. 147f

„e' egualmente lunghi, l'uno de i quali sia voto, e l'altro massiccio, hanno tra di loro la medesima proporzione, che i lor Diametri.“

Hervorzuheben sind Galileis Beobachtungen dieser Traglaststeigerung in der Natur und die Identifizierung der Übertragung dieses Gestaltkonzeptes auf Wurf Waffen mit hohlen Holz- oder Metallschäften. Der zuvor bemerkte fehlende Transfer in dem konstruktiven Baubereich wird aber auch hier nicht vollzogen; insgesamt sind seine Biegezugexperimente auf Kragträgern und Biegebalken beschränkt, der Stab als knickgefährdete Stütze wird nicht explizit thematisiert. Auch eine systematische Unterscheidung der aufgezählten Beispiele aus Natur und Technik anhand des statischen Systems und seiner Belastung wird nicht getroffen: Der Getreidehalm als Stütze im überkritischen Zustand einer Drehfederlagerung ebenso wenig, wie der Knochen mit seinen unterschiedlichen Beanspruchungsarten oder die Lanze im Zustand der Beschleunigung und der Impulsweitergabe beim Aufprall.

Spätestens seit Leonardo Da Vinci ist aber das Tragverhalten einer Stütze von dem eines Biegeträgers zu unterscheiden. Galileis frühe Beiträge werden heute in erster Linie für die Klärung des Problems der Maßstabsübertragung gewürdigt, für die die berühmte Illustration des absurd skalierten Knochens steht. Eine Anerkennung seiner Ausführungen zur Biegezugfestigkeit wurde dagegen unter Hervorhebung seiner falschen Annahme der Zugkraft in der Schwerachse lange Zeit unterlassen. Fritz Scheidegger² konnte dagegen zeigen, dass Galilei innerhalb seines Argumentationsraumes, der den Unterschied zwischen elastischer Spannung und Bruchspannung noch nicht kannte, zu richtigen Ergebnissen kam. Für ihn manifestiert sich in den Aussagen Galileis:

„Die Analyse der Transformation der technischen Zweck-Mittel-Beziehung in Form der Erkenntnis des Wirkungs-Ursache-Zusammenhangs der technisch gestellten Natur [...]“³

Zu würdigen ist der wissenschaftliche Ansatz Galileis, Gleiches mit Gleichem zu vergleichen, um eine aussagekräftige Korrelation zwischen Gestaltform und Bruchlast zu finden – hier auf Biegezugkräfte beschränkt. Dieser Grundsatz wird im Folgenden bei verschiedenen Beiträgen über die Eignung von Gusssäulen und Hohlprofilen zu beachten zu sein.

² Scheidegger: Frühgeschichte der Festigkeitslehre, 1992

³ Scheidegger: Frühgeschichte der Festigkeitslehre, 1992, S. 53

8.4 Bemessungsverfahren

Die getroffenen Aussagen zur Leistungsfähigkeit des Materials und seiner Formbarkeit zur günstigen Gestaltform für Druckstäbe in der Tabelle VIII. 1 u. Tabelle VIII. 2 sind prinzipieller Art und müssen für die praktische Anwendbarkeit von der charakteristischen Bruchspannung auf eine zulässige Spannung reduziert werden, sodass die Widerstände bei Beachtung der Knickgefahr größer als die Einwirkungen sind.

Eine Bemessungsformel identifiziert grundsätzlich den Bereich des ausreichenden Widerstandes gegenüber den Einwirkungen; ein Überschreiten des Widerstandes führt zum Versagen des Tragstrukturelementes und ein starkes Unterschreiten zu unwirtschaftlichen Bauweisen. Sicherheitskoeffizienten auf Seiten des Widerstandes und auf Seiten der Einwirkungen berücksichtigen auf statistischer Grundlage die Streuung der Materialeigenschaften, Geometrieabweichung und der Lastannahme. Die Wirtschaftlichkeit scheint somit zunächst nachgeordnet zu sein, was die unmittelbaren Konsequenzen durch einen Totalverlust bei Unterbemessung betrifft; im Bauwesen ist aber die wirtschaftliche Bemessung der Werkstoffe ein wichtiger Wettbewerbsvorteil und eine Annäherung an die technisch verantwortbare Traglast das Ziel jeder Ingenieurskunst.

8.4.1 Barrés Schnellbemessung – implizite Aussagen zur Effizienz

An dieser Stelle soll zunächst ein historischer Beitrag über die Bemessung von massiven und hohlen Gussstützen gewürdigt werden, der im ausgehenden 19. Jahrhundert vielfach zitiert wurde und auf die Voruntersuchungen Hodgkinsons Bezug nimmt. Der Artikel soll hinsichtlich der beiden Aspekte Sicherheit und Wirtschaftlichkeit näher betrachtet werden:

M. Barré stellt in seinem Artikel von 1870, *Résistance des Colonnes en Fonte*⁴, zwei Interaktionsdiagramme zur Bemessung von Gussstützen vor (Abb. VIII. 2). Eines für Gussstützen mit massiven Querschnitten von 10 cm bis 25 cm Durchmesser (Abb. VIII. 3) und maximaler Länge von 12 m und ein zweites für hohle Gussstützen (Abb. VIII. 4), beginnend bei 12 cm Außendurchmesser bis 30 cm, wobei die Standardwandstärke mit 1/10 des Außendurchmessers angegeben wird; die hohlen Stützen werden auch bis zu einer Länge von 12 m erfasst. Dem Werkstoff Gusseisen weist er nach Versuchen an kleinen Prismen eine Bruchfestigkeit von $7500 \frac{kg}{cm^2}$ zu, die er auf eine zulässige Gebrauchs-

Anm.:

Die von Barré genannte Bruchfestigkeit des Gusseisens lag danach bei ca. $\sigma_{Bruch} \approx 730 \frac{N}{mm^2}$, was dem heutigen Gusswerkstoff EN-GJL-200 mit

$\sigma_{Bruch} = 720 \frac{N}{mm^2}$ bzw.

$\sigma_{zul.0,1} = 260 \frac{N}{mm^2}$ entspräche. Das $\sigma_d = 236 \frac{N}{mm^2}$ aber doppelt so hoch wie das von Barré mit

$\sigma_d = 122,6 \frac{N}{mm^2}$

Barré: *Résistance des colonnes*, 1876, S. 194f

⁴ Barré: *Résistance des colonnes*, 1870

spannung von $1250 \frac{kg}{cm^2}$ reduziert. Er betont aber, dass es dem Konstrukteur grundsätzlich freigestellt sei, den Sicherheitskoeffizienten von $\frac{1}{6}$ zu variieren, um das Maß der Sicherheit auf die Art und die Funktion der Konstruktion sinnvoll anzupassen.⁵

Die detaillierte Darstellung dieses historischen Schnellbemessungsverfahrens ist im Kontext der Argumentationsstrukturen über die Eignung von Hohlprofilen aufschlussreich. Der Artikel thematisiert die Bemessung von massiven und hohlen Gussstützen explizit und verzichtet auf die Einordnung innerhalb möglicher Alternativen des Materials oder der Gestaltform. Die Kriterien für eine wirtschaftliche Bemessung werden nur implizit genannt, wie gezeigt werden kann, und nicht in letzter Konsequenz dem Konstrukteur als Entscheidungshilfe an die Hand gegeben.

Die Interaktionsdiagramme werden im Original großformatig abgebildet (Abb. VIII. 2) und von Querschnittsabbildungen der massiven und hohlen Gussstützen und deren Metergewicht ergänzt. Im begleitenden Artikel werden anhand von Beispielen die Vorzüge der Schnellbemessung anhand der Interaktionsdiagramme vorgestellt, mit dem Hinweis, dass auch abweichende Quermesser durch lineare Interpolation aus den Diagrammen einfach abzulesen seien.

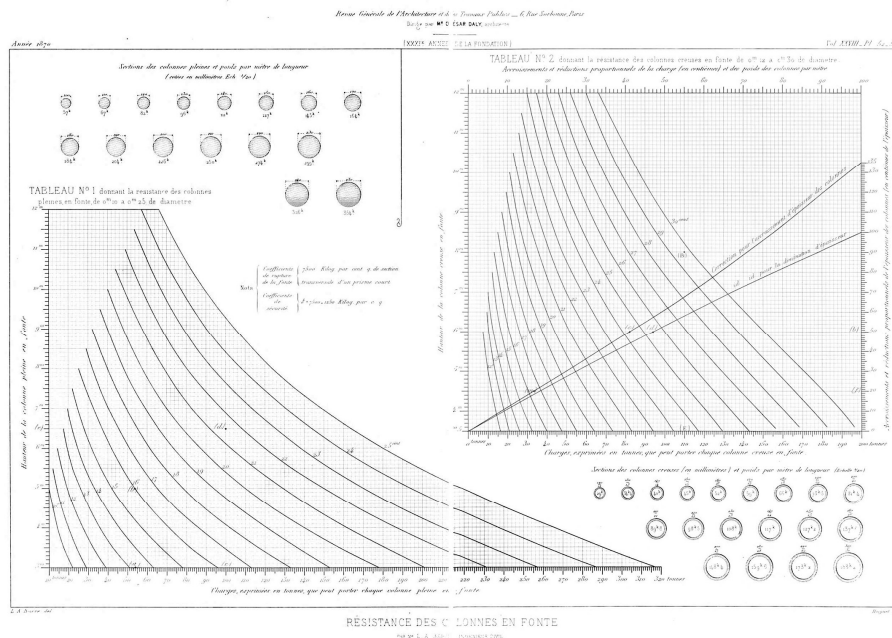


Abb. VIII. 2: Interaktionsdiagramme zur Schnellbemessung von Gussstützen nach Barré, 1870

⁵ Siehe: Barré: Résistance des colonnes, 1870, S. 195

Interessant sind die Hauptaussagen des Textes über den Zusammenhang von Proportion und Traglast, die im Folgenden kurz kommentiert wiedergegeben werden sollen:

- 1.) Mit Bezug zu Love⁶ und Hodgkinson⁷ wird folgendes Gesetz (aus) der Praxis genannt:

Übersetzung zu 8:
*"Der Widerstand einer
 Hohlsäule ist gleich der Differenz der Widerstände zweier
 massiver Säulen, die als Durchmesser einen entsprechenden
 Außendurchmesser und einen
 Innendurchmesser haben [...]"*

„La résistance d'une colonne creuse est égal à la différence des résistances de deux colonnes pleines ayant pour diamètres, l'une le diamètre extérieur, l'autre le diamètre intérieur [...]“⁸

Die Behauptung, der Widerstand einer hohlen Säule sei gleich dem Widerstand aus der Differenz einer massiven Säule mit gleichem Außendurchmesser der Hohlsäule abzüglich einer massiven Säule mit dem Außendurchmesser des Innendurchmessers der Hohlsäule, wäre aus rein spannungstechnischen Aspekten richtig und kann ggf. aus heutigem Wissensstand nur für sehr gedrungene Zylinder angenommen werden, ist hier bei den behandelten Schlankheiten $\lambda > 30$ aber irrtümlich. Die zulässige Anwendung dieses Satzes auf die Kenngröße des Flächenträgheitsmomentes unterbleibt und wird nicht zur Formulierung eines komplexeren Begriffes der Schlankheit genutzt.

- 2.) Ohne genauere Herleitung wird, wieder mit Bezug auf Love, eine Bemessungsformel für massive Querschnitte eingeführt, die die mathematische Grundlage für das erste Interaktionsdiagramm bildet:

Zu Gl. VIII. 1:

$$C = S \cdot K$$

R: zulässige Traglast in kg

S: Querschnittsfläche in cm^2

K: Druckfestigkeit; ein Sechstel der Bruchfestigkeit von 7500 kg/cm^2 für Gusseisen

L: Länge in Metern

D: Außendurchmesser in Metern

Gl. VIII. 1

$$R = \frac{C}{1,45 + 0,00337 \left(\frac{L}{D}\right)^2}$$

Diese einfache Schlankheit, ausgedrückt im Verhältnis von Höhe (L) zu Durchmesser (D), berücksichtigt die Proportion und quadriert diese, sodass ein Hyperbelverlauf des Graphen grundsätzlich gegeben ist.

⁶ Siehe: Love: Résistance de la fonte, 1852, S. 37

⁷ Siehe: Hodgkinson: Strength of Pillars, 1840

⁸ Barré: Résistance des colonnes, 1870, S. 194

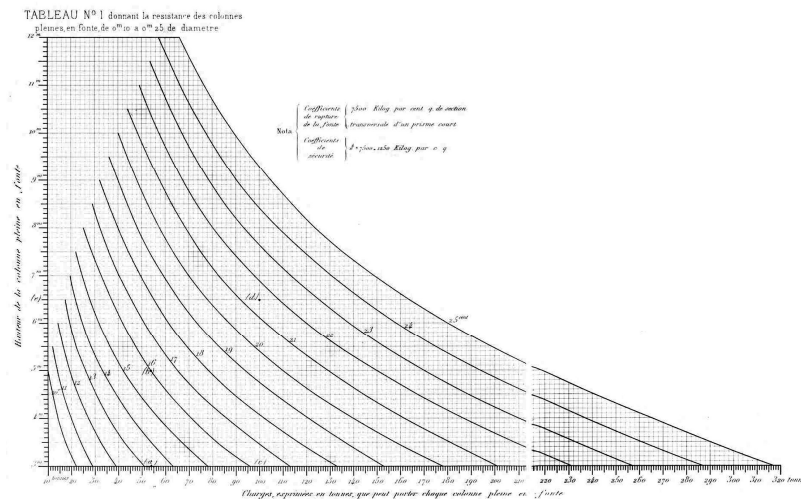


Abb. VIII. 3: Bereinigter Ausschnitt aus Abb. VIII. 2, Interaktionsdiagramm massiver Gussstützen nach Barré, 1870

Diese Gl. VIII. 1 wird in der Konsequenz aus Satz 1 auf die Gussstützen mit hohlen Querschnitt ausgeweitet:

$$\text{Gl. VIII. 2} \quad R = \frac{S \cdot K}{1,45 + 0,00337 \left(\frac{L}{D}\right)^2} - \frac{S' \cdot K}{1,45 + 0,00337 \left(\frac{L}{D'}\right)^2}$$

Es wird ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Traglast und der Schlankheit angenommen:

„[...] si la rapport de la hauteur de la colonne à son diamètre est constant, la charge par centimètre carré est constant: il en résulte que pour deux colonnes pleines semblables (hauteurs et diamètres proportionnels), la charge par centimètre carré de section transversale est la même, et les charges totales sont proportionnelles aux sections ou bien aux carrés des diamètres. Ainsi, toutes les dimensions d'une colonne sont-elles réduites à moitié, la résistance est réduite au quart. D'après cette loi très-simple, il est facile de calculer la résistance d'une colonne dont les dimensions dépassent celles du tableau.“⁹

Im Beispiel dazu wird eine massive Stütze von 13 m Höhe und 43 cm Durchmesser bemessen. Sie kann, gemäß dieses Proportionalitätsgesetzes, über eine Traglast für eine Stütze von 6,5 m Höhe und 21,5 cm Durchmesser aus dem Interaktionsdiagramm entnommen werden, wenn man das Ergebnis einfach mit dem Faktor 4 multipliziert.

Es wird fälschlicherweise von einer geometrischen Kongruenz auf die eines des Tragvermögens geschlossen, wonach Säulen gleicher Proportion immer eine gleiche Gebrauchsspannung aufweisen würden, die über alle Längen als sicher und ausreichend anzunehmen wäre. Da zwar Barré der Spannungsbe-

Zu Gl. VIII. 2:

Der erste Term steht für den massiven Querschnitt subtrahiert um einen massiven Querschnitt, Term 2 mit S', der dem Innendurchmesser der Hohlstütze entspräche.

Übersetzung zu ⁹:

„[...] wenn das Verhältnis der Höhe der Säule zu ihrem Durchmesser konstant ist, ist die Belastung pro Quadratcentimeter ebenfalls konstant: Das Ergebnis ist, dass für zwei gleichartige massive Säulen (Höhen und proportionale Durchmesser) die Belastung pro Quadratcentimeter Querschnitt proportional zu den Querschnitten oder Quadraten der Durchmesser ist. So werden alle Abmessungen einer Säule um die Hälfte reduziert, der Widerstand um ein Viertel. Nach diesem sehr einfachen Gesetz ist es einfach, die Stärke einer Säule zu berechnen, deren Abmessungen die Angaben aus der Tabelle übersteigen.“

⁹ Barré: Résistance des colonnes, 1870, S. 196

griff geläufig ist und die Verdoppelung des Durchmessers zu einer Vervierfachung der Fläche führt, geht er somit von gleichen Spannungen aus, die zu einer Vervierfachung auch der Traglast im Resultat führt. Dies ist umso erstaunlicher, als dass er beispielhaft die Bemessung von Stützen oberhalb der im Interaktionsdiagramm erfassten Höhen und Durchmesser auf dieser Grundlage vorrechnet und Galileis simples Ähnlichkeitsgesetz vernachlässigt und Eulers Erkenntnisse über den zunehmenden Einfluss der Stablänge ignoriert.

- 3.) Das zweite Interaktionsdiagramm (Abb. VIII. 4) berücksichtigt durch zwei zusätzliche Skalen die mögliche Variation der Wandstärke, abweichend vom Standard 1/10 des Außendurchmessers.

Es war das selbsternannte Ziel des Autors Barré, dem Konstrukteur ein Schnellbemessungsverfahren für massive wie auch hohle Gussstützen an die Hand zu geben, das eine wirtschaftliche Bemessung gewährleistet, da auch Zwischenwerte sicher abgelesen werden konnten – ohne den Aspekt der Wirtschaftlichkeit über die Effizienz selbst zum Maßstab zu machen.

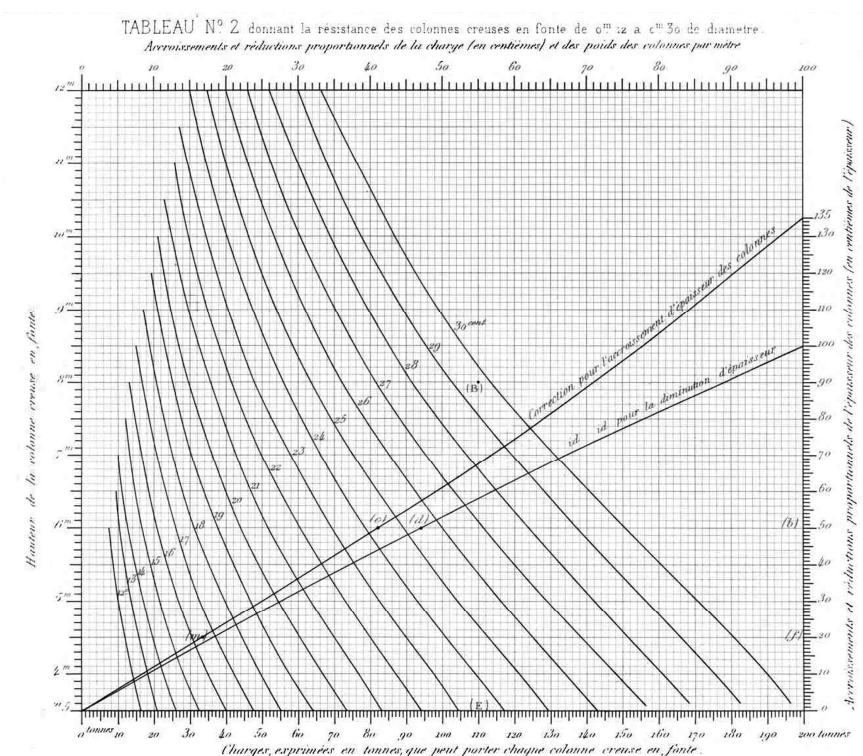


Abb. VIII. 4: Ausschnitt aus Abb. VIII. 2, Interaktionsdiagramm hohler Gussstützen nach Barré, 1870

Auch wenn man mit dem heutigen Kenntnisstand die Aussagekraft und Richtigkeit der Berechnung bezweifeln muss, so ist doch aus der zeitgenössischen Perspektive interessant, dass eine Effizienzbetrachtung auf Grundlage des Einflusses der Gestaltform zwischen den Grundtypen massiv und hohl ausbleibt:

- 1.) Der Aspekt des Konstruktionsgewichtes im Verhältnis zur Traglast ist leicht aus dem Graphen und dem gegebenen Metergewicht zu ermitteln. Eine hohle Gussstütze würde nach dieser Bemessungsmethode das 1,6fache einer massiven Stütze bei gleichem Gewicht und Länge an Traglast aufweisen. Es handelt sich um ein relevantes Einsparpotenzial von Werkstoffmenge und Eigengewicht.
- 2.) Dieser Effizienzfaktor von 1,6 bleibt unkorrigiert, was den möglichen Einfluss der unterschiedlichen Kosten für massive gegenüber hohle Stützen betreffen könnte.

8.4.2 Explizite Aussagen zur Effizienz bei Klasen um 1876

Wenige Jahre später wird Ludwig Klasen in seinem *Handbuch der Hochbau-Constructionen in Eisen*¹⁰ den Aspekt der Wirtschaftlichkeit zum Maßstab erheben.

Nach Klasen haben sich die gusseisernen Stützen aufgrund ihrer Leistungsfähigkeit, aus England kommend, eingeführt. Sie besitzen 1876 noch den Vorteil, dass der Gießprozess einen sehr günstigen kreisrunden Hohlquerschnitt gestattet, den man vor der Einführung des Mannesmann-Rohres nicht aus Schmiedeeisen bzw. Stahl fertigen konnte. Es werden zwar Alternativen aus zusammengesetzten Walzprofilen erwähnt, hier ist die gewalzte Kreuzeisenstütze der Burbacher-Hütte¹¹ hervorzuheben, diese kommen aber nach seinem Kenntnisstand der Technik nur für oszillierende Beanspruchungen in Frage, da sie verhältnismäßig teuer seien. Die Gussstütze hat sich scheinbar soweit etabliert, dass er eine einführende Herausstellung der geometrischen und materiellen Aspekte unterlässt und gebaute Beispiele heranzieht, die unter anderem ihre Effizienz herausstellen.

Er zitiert einen gewissen Köpke, wonach für einen viergeschossigen Lagerhausbau, die nach Hodgkinson bemessenen Gussäulen im Erdgeschoss mit 248 mm Außendurchmesser und einer Wandstärke von 27 mm zwar gegenüber Holzstützen 123% teurer seien, diese aber einen quadratischen Querschnitt von 0,5 m haben müssten und dennoch nicht dieselbe Sicherheit gegenüber Bruch aufweisen würden.

8.4.3 Explizite Aussagen zur Effizienz bei Königer um 1902

In Königers *Die Konstruktionen in Eisen*¹² von 1902 verschiebt sich, nach Meinung des Autors, die bevorzugte Eignung von Gussstützen für das Bauwesen zu solchen aus Schmiedeeisen, wenn auch für letztere neben den teureren schweißeisernen Röhren mit Schweißnaht immer noch

¹⁰ Klasen: Hochbau-Constructionen in Eisen, 1876

¹¹ Siehe: Klasen: Hochbau-Constructionen in Eisen, 1876, S. 128

¹² Königer: Die Konstruktion in Eisen, 1902

zusammengesetzte Querschnitte aus Quadranteisen angeführt werden. Im Anhang des Buches werden in den Tabellen die Querschnittswerte von gusseisernen Hohlsäulen, schweißeiserne Röhren und die Normalprofile für Quadranteisen aufgeführt. Die standardisierten Durchmesser für gusseiserne Hohlsäulen decken einen weiten Bereich von 10 cm bis 40 cm Außendurchmesser ab, der bis zum Durchmesser 30 cm in 1 cm-Schritten unterteilt ist und danach in 2 cm-Schritten bis 40 cm Außendurchmesser ansteigt. Jeder Außendurchmesser war in 6 bzw. 9 verschiedenen Wandstärken lieferbar. Bei den schweißeisernen Röhren erstreckte sich das Sortiment von konstruktiven Kleindurchmessern von 38,1 mm bis zu statisch nutzbaren Durchmessern von max. 31,75 cm; jedoch wurde jedem Außendurchmesser nur eine Wandstärke zugeordnet.¹³

Für Leitungszwecke bis 10 Atmosphären Betriebsdruck werden separat die gusseisernen Muffenrohre mit bis zu 1200 mm Innendurchmesser gelistet, die eine vollzogene Trennung von Rohrleitungen und Rohrstützen in der Praxis belegt.¹⁴

Nah an der Praxis wird einführend wieder ein monetärer Vergleich gezogen: Danach hat eine schmiedeeiserne Stütze bei 5 m Länge und 14,4 t Traglast ein um 43% geringeres Gewicht gegenüber einer aus Gusseisen, und sei trotz der zusätzlichen Arbeitsleistung für das Nieten um 16% günstiger. Ein weiterer Nachteil wird in der schwankenden Güte des gegossenen Materials gesehen, sodass bei hoch belasteten Stützen eine Probelastung zum Nachweis der Tragfähigkeit erforderlich sei. Ein scheinbar verbreitetes Argument für Gussstützen hinsichtlich des besseren Brandverhaltens auf Grundlage von Versuchen von Prof. Bauschinger, wird durch neuere Versuche aus den Jahren 1885/86 entkräftet.¹⁵ Allein in der freien Formgebung durch den Gießvorgang sieht der Autor einen verbleibenden Vorteil. Grundsätzlich rät er aber von der praktizierten Nutzung der hohlen Stützen zum Zwecke der Rauchgasabführung oder Dachentwässerung ab, da dadurch die Standfestigkeit langfristig gefährdet wird. Die Vorzüge des Kreisrings als tragender Querschnitt wird hier als Allgemeinplatz sehr kurzgehalten; neu ist die Betonung der günstigen Beflammungsfläche gegenüber Kreuzquerschnitten oder zusammengesetzten offenen Querschnitten im Brandfall.

Die gusseiserne Stütze kann rückblickend als komplementäre Brückentechnologie eingeordnet werden, da sich bereits um 1900 abzeichnete,

¹³ Königer: Die Konstruktion in Eisen, 1902, S. 29 Anhang, Tabelle 32

¹⁴ Königer: Die Konstruktion in Eisen, 1902, S. 28 Anhang, Tabelle 31

¹⁵ Siehe: Königer: Die Konstruktion in Eisen, 1902, S. 54

dass sich die duktilen Eisenwerkstoffe im Bauwesen allgemein durchzusetzen begannen; wenn auch zunächst im Bereich der Biegeträger. Mit der Verfügbarkeit des nahtlosen Mannesmannrohres war auch der leistungsfähige Werkstoff Stahl in variablen Rohrdurchmessern ab den 1890er Jahren verfügbar. Der Walzprozess ermöglichte dünnere Wandstärken gegenüber dem Gießprozess bei den Gussstützen und das E-Modul lag um fast das Doppelte höher.

8.4.4 Bemessung – von der Empfehlung zur Verordnung

Die Frage nach einer einheitlichen Bemessung bekam ab den 1870er Jahren in Deutschland eine höhere gesellschaftspolitische Relevanz, da mit der Gründerzeit die Qualität und Quantität der Baumaßnahmen sich verändert. Es wurde im städtischen Kontext immer höher und dichter gebaut, sodass baupolizeiliche Verordnungen regulierend in die Freiheiten des Konstrukteurs eingriffen, um nicht zuletzt wohl auch die Interessen der Gebäudeversicherer zu wahren.

Man findet diese Entwicklung bei Horst Bargmann in seinem Standardwerk *Historische Bautabellen*¹⁶ im chronologischen Überblick abgebildet. Die historische Entwicklung der Bemessung von Druckstäben mit kreisringförmigen Querschnitten aus Gusseisen, Schmiedeeisen und Flusseisen bzw. Flussstahl wird differenziert für die innovativen Zeiten von 1870 bis in die 1960er Jahre dargestellt. Die Eisenwerkstoffe Schmiedeeisen, Schweißstahl und Flusseisen ergänzen das Gusseisen als Druckstab mit kreisringförmiger Querschnittsfläche, und liegen mit ihren Sicherheitsbeiwerten unterhalb denen des Gusseisens (Tabelle VIII. 3 und Tabelle VIII. 4).

Tabelle VIII. 3: Historische Sicherheitsbeiwerte für Druckstäbe aus Gusseisen nach Bargmann

Jahr:	Geltungsbereich:	Sicherheitsbeiwert:
1872	k. A.	6,0
1887	Berlin	8,0
1890	Berlin	6,0
1910	Berlin	6,0-8,0
1917	Hamburg	6,0-8,0
1918	Preußen	8,0
1919	Preußen	6,0-8,0
1925	Preußen	6,0
1928	Hamburg	6,0

¹⁶ Siehe: Bargmann: *Historische Bautabellen*, 2013, S. 312

Tabelle VIII. 4: Historische Sicherheitsbeiwerte für Druckstäbe aus Schmiedeeisen, Schweißisen und Flusseisen nach Bargmann

Jahr:	Werkstoff:	Geltungsbereich:	Sicherheitsbeiwert:
1887	Schweißisen	Berlin	5,0
	Flusseisen	Berlin	5,0
1890	Schmiedeeisen	Berlin	5,0
1910	Flusseisen	Berlin	5,0
1917	Schmiedeeisen	Hamburg	5,0
	Flusseisen	Hamburg	4,0
	Schmiedeeisen	Hamburg	2,5
1918	Flusseisen	Preußen	4,0-5,0
1919	Flusseisen	Preußen	5,0

Für die Bemessung von Gussstützen wird ab 1890 ein $I_{min.}$ mit folgender Formel ermittelt:¹⁷

$$\text{Gl. VIII. 3} \quad I_{min.}[cm^4] = 6 \cdot P[t] \cdot L[m]^2$$

Der konstante Faktor vor P ist der Sicherheitsbeiwert gemäß Tabelle VIII. 3, die Wahl der hohlen Gussstütze konnte so über tabellarische erfasste Flächenträgheitsmomente erfolgen.

Ab 1903 wird parallel zum vereinfachten Verfahren gemäß Gl. VIII. 3, ein komplexeres Verfahren nach v. Tetmajer eingeführt, das bis zu einer Schlankheit $\lambda = l/i < 80$ galt:¹⁸

Anm.:
Hier:
 l : Länge in cm
 i : Trägheitsradius in cm

$$\text{Gl. VIII. 4} \quad N_{zul.}[kg] = K_k \left[\frac{kg}{cm^2} \right] \cdot \frac{A[cm^2]}{S}$$

Für K_k wurden in Abhängigkeit von steigendem λ abnehmende Spannungen angegeben. Im Bereich oberhalb der Schlankheit 80 sollte die Eulerformel, um den Sicherheitsfaktor ergänzt, gelten.

¹⁷ Bargmann: Historische Bautabellen, 2013, S. 317

¹⁸ Bargmann: Historische Bautabellen, 2013, S. 319

Eine Gebrauchsformel nach Gehler wurde 1923 für unkritische Schlankheiten $\lambda < 100$ der Werkstoffe St.37, St.48 und St.52 eingeführt, die den Profilwert k in Abhängigkeit der Querschnittsfläche in Relation zum Quadrat des Trägheitsradius etabliert:¹⁹

$$\text{Gl. VIII. 5} \quad k[/] = \frac{A[cm^2]}{i[cm]^2}$$

Dabei konnte man k für den Kreisringquerschnitt als Näherungswert aus dem Verhältnis der Wandstärke (δ) zum mittleren Halbmesser (ϱ) ermitteln:

$$\begin{aligned} \text{Gl. VIII. 6} \quad k[/] &= 0,63 \leftarrow \delta \div \varrho = 0,05 \\ k[/] &= 1,25 \leftarrow \delta \div \varrho = 0,10 \\ k[/] &= 1,87 \leftarrow \delta \div \varrho = 0,15 \\ k[/] &= 2,50 \leftarrow \delta \div \varrho = 0,20 \end{aligned}$$

Die eigentliche Bemessungsformel ergab einen erforderlichen Querschnittswert:

$$\text{Gl. VIII. 7} \quad \text{St. 37: } A_{erf.}[cm^2] = \frac{N[t]}{1,4} + 0,577kl[m]^2$$

$$\text{St. 48: } A_{erf.}[cm^2] = \frac{N[t]}{1,82} + 0,675kl[m]^2$$

$$\text{St. 52: } A_{erf.}[cm^2] = \frac{N[t]}{2,1} + 0,718kl[m]^2$$

Dieser Nachweis wird am 25.02.1925 durch das ω -Verfahren in Preußen abgelöst unter der DIN 4114 ab 1952 fortgeschrieben.

¹⁹ Bargmann: Historische Bautabellen, 2013, S. 319f

Zu Abb. VIII. 5:

Die Tuschezeichnung (46x69 cm) wurde vom Architekten Dipl.-Ing. Robert Schniete 1932 während seiner Assistenz am Lehrstuhl für Hochbaustatik, Prof. Dr.-Ing. Kesselring, verfasst und fällt vermutlich schon in die Vorbereitung seiner Dissertation zum Thema „*Untersuchungen über den Einfluß des Wassergehaltes auf die Druckfestigkeit von Harzer Fichtenholz*“ von 1942 am selben Lehrstuhl. Die Kriegszeit verbrachte Dr.-Ing. Schniete dann am Franz-Seldte-Institut der Deutschen Akademie für Bauforschung, wo effiziente Bauweisen erprobt wurden. 1948 folgte er auf den Lehrstuhl Kesselrings und war dort bis zu seinem frühen Tod 1956 ordentlicher Professor für Hochbaustatik.

s. Archivale Schniete: Personalakte, 1956 u. Schniete: Druckfestigkeit Harzer Fichtenholz, 1942

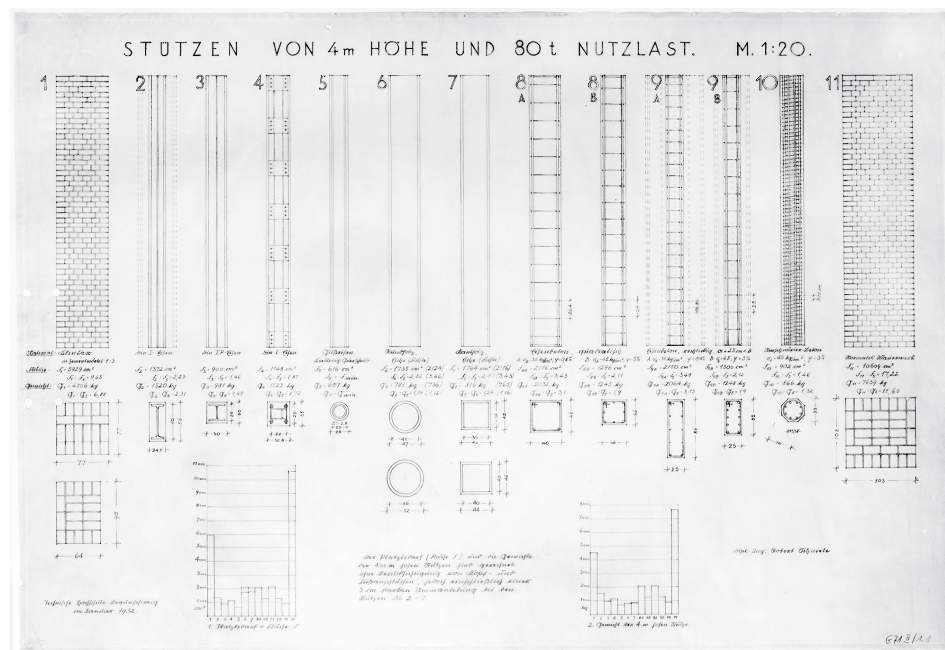
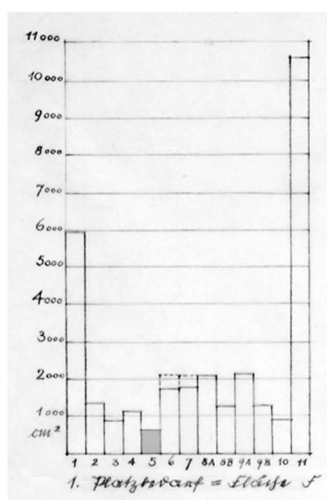


Abb. VIII. 5: Vergleich verschiedener Stützenkonstruktionen bei gleich Nutzlast, N° 5
Gusseisenrohr, Dipl.-Ing. Schniete TH Braunschweig 1932

Von Professor Robert Schniete (1903-1956) ist aus den 1930er Jahren ein Planblatt (Abb. VIII. 5) erhalten, das unter Maßgabe der einschlägigen Bemessungsverfahren 11 Stützen gleicher Höhe mit 80 t Traglast konstruktiv abbildet. In dieser Zusammenstellung werden der Konstruktionsraum (Abb. VIII. 6) und das Konstruktionsgewicht (Abb. VIII. 7) wieder zum Vergleichsmaßstab, der in beiden Aspekten auch hier vom Gusseisenrohr am besten erfüllt wird.



Zu Abb. VIII. 6:

Die Bildunterschrift in Sütterlin geschrieben lautet:
1. Platzbedarf = Fläche F

Abb. VIII. 6: Ausschnitt aus o. g. Planblatt, Gegenüberstellung des Platzbedarfes von verschiedenen Stützen bei 80 t Tragkraft, Gusseisenrohr grau markiert, Dipl.-Ing. Schniete TH Braunschweig 1932

Es kann vermutet werden, dass diese Übersicht zu Lehrzwecken im zuvor genannten Sinn verwandt wurde, da es sich bei den gewählten Konstruktionen um zeitgenössisch typische handelte, die auch Aspekte des Brandschutzes mit einbezogen; so ist das Gusseisenrohr mit einer Putzschicht vor direkter Beflammung geschützt. Interessanterweise ist das Gusseisenrohr ohne den Vergleich mit dem nahtlosen Stahlrohr in den 1930er ein Anachronismus, der darauf schließen lässt, dass Stahlrohrkonstruktionen noch nicht zum Kanon der Baukonstruktionslehre an der TH in Braunschweig gehörten.

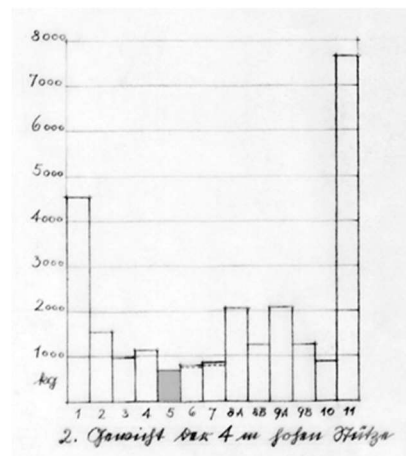


Abb. VIII. 7: Ausschnitt aus o. g. Planblatt, Gegenüberstellung des Gewichtes von verschiedenen Stützen bei 80 t Tragkraft, Gusseisenrohr grau markiert, Dipl.-Ing. Schniete TH Braunschweig 1932

Anm.:

Die Mannesmann Röhren Werke publizierten bereits 1912 in ihrer Liste Nr. 197 *Säulen* aus nahtlosem Mannesmannstahlrohr, beginnend mit 64 mm Quermesser bis 305 mm. Lieferbar waren auch Kopf- und Fußplatten wie bei den traditionellen Gussstützen üblich. Siehe: Mannesmann: Preislisten, 1912, S. 619-631

Zu Abb. VIII. 7:
Die Bildunterschrift in Sütterlin geschrieben lautet:
2. Gewicht von 4 m hohen Stützen

8.5 Das Stahlrohr wird Konstruktionselement

Das Stahlrohr beziehungsweise das kreisrunde Hohlprofil wird gegenwärtig mit einer Vielzahl von positiv verstandenen Attributen wie zum Beispiel optimaler Gestalteinfluss, geringes Konstruktionsgewicht, universelle Steifigkeit, lange Standzeit und nicht zuletzt Formschönheit im Kontext des Bauwesens charakterisiert, die seine Anwendung in der Mehrheit der konstruktiven Entscheidungen zunächst nahelegen scheinen.

Anm. zu ²⁰:

Diese Einordnung entspricht der verfügbaren Vielfalt von geschlossenen Profilen; war das Rundrohr der Ausgangspunkt, so sind heute eckige und auch elliptische Hohlprofile verfügbar, die durch Umformen aus kreisförmigen Hohlprofilen gewonnen werden. Besonders die quadratischen und rechteckigen Hohlprofile sind auf Grund ihrer Geometrie für gemischte Konstruktionen aus geschlossenen und offenen Profilen geeignet.

Petersen²⁰ ordnet dagegen unaufgeregt die Rundrohre gegenwärtig in die Kategorie der geschlossenen Profile ein und sieht ihre Eignung aufgrund ihres großen Trägheitsradius für Stützen mit planmäßiger mittlerer Druckbeanspruchung, die aber in jedem Einzelfall kritisch zu belegen sei. Die Wahl des Querschnittes wird nach seiner Meinung von Faktoren bestimmt, die nicht im engeren Entscheidungsbereich des Stahlhochbaukonstruktors liegen: Ästhetische Gestalt, Brandschutz, Installationen und Minimierung des Platzbedarfes werden hier beispielhaft genannt. Nach seinem Verständnis kann es in der Konstruktion von Prototypen, wie im Bauwesen üblich, keine absoluten Aussagen zur Eignung von Profilquerschnitten geben. Im Gegenteil ist die Vielfalt der Profile ein Gradmesser für die notwendigen Entscheidungsfreiheiten des Konstrukteurs im Geflecht der vielschichtigen Anforderungen mit ihren Interdependenzen.

Anm.:

Der Stahlverbundbau bildet hier eine Besonderheit, da das kreisrunde bzw. quadratische Hohlprofil als mittragende, verlorene Schalung gleichzeitig Gefäß- und Tragstrukturelement ist.

Tatsächlich kann man in dieser Konsequenz, aus der Sicht des Tragwerksplaners, nur zwei Anwendungsfälle identifizieren, in denen das kreisrunde Hohlprofil auf Grundlage seines Materials und der Gestaltform uneingeschränkt prominent ist: Der echte Pendelstab und der Torsionsstab. In beiden Fällen ist die Gestaltform, beschreibbar durch den Trägheitsradius, besonders günstig (Abb. VIII. 8). Dieser Erkenntnis geht die Prämisse voraus, dass ausschließlich Halbzeuge mit ihrem typischen, unveränderlichen Querschnittsdesign über die Längsachse berücksichtigt werden, die zu Zeit als normiertes Serienprodukt noch wirtschaftlich überlegen sind. Eine individuelle Optimierung der Gestaltform, entsprechend der Knickfigur für den Eulerfall II über die Längsachse oder eine strukturelle Optimierung durch zusammengesetzte Querschnitte, ist dagegen nur durch Mehrkosten erzielbar – was im Kapitel 9 über die Optimierungsstrategien thematisiert wird.

²⁰ Siehe: Petersen: Stahlbau, 2013, S. 668ff

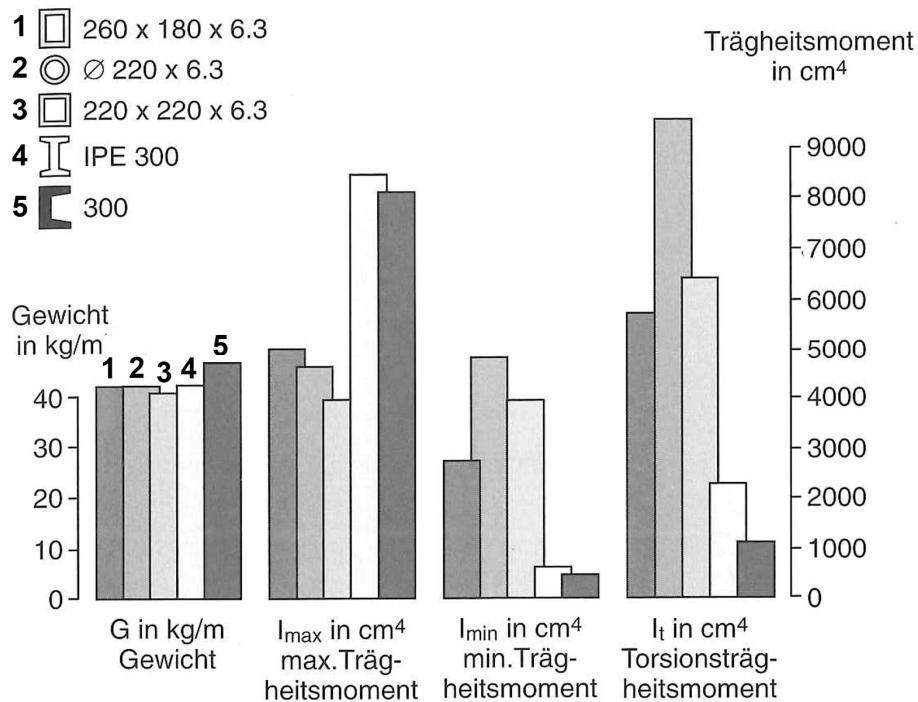


Abb. VIII. 8: Vergleich von Walzprofilen nach Höhe des Flächenträgheitsmomentes bei ähnlichem Metergewicht bei Dipak Dutta

8.5.1 Attribute von Hohlprofilen

Die von Petersen skizzierte Mitsprache anderer Fachingenieure bei der Tragwerksplanung bedingt, dass Hohlprofile an verschiedenen fachspezifischen Anforderungen gemessen werden können. Im Folgenden sollen die wesentlichen Eigenschaften zusammengestellt werden, die als besondere Aspekte der fächerübergreifenden Eignung im konstruktiven Hochbau in der Literatur gegenwärtig genannt werden. Die Kategorien orientieren sich, zunächst ohne Gewichtung untereinander, an den Zuständigkeitsaspekten der Fachplaner:

- 1.) Konstruktiv und statisch den Kreisringquerschnitt betreffend:
 - a. Günstiger Trägheitsradius zur Aufnahme von Torsionsmomenten und Drucknormalkräften bei stabilitätsgefährdeten Bauteilen $\lambda > 100$, duktiles Werkstoffverhalten wirkt sich günstig aus.
 - b. Einsinnige Krümmung der Zylinderschale ist auch bei geringer Wandstärke bei großen Radien weniger beulgefährdet als bei anderen Querschnitten mit ebenen Wandstärken, duktiler Werkstoffverhalten vorausgesetzt.
 - c. Es lässt sich wirkungsvoll durch konstruktive Maßnahmen im Innern die Stabilität zusätzlich steigern, ohne dass die äußere Erscheinung beeinflusst wird; z.B. Stahlverbundbauweise oder zusätzliche Bleche im Innern.
 - d. Der Hohlraum kann parallel zur eigentlichen Tragfunktion für den Transport von Gasen, Flüssigkeiten oder Feststoffen dienen und ist gegenüber Druckunterschieden zwischen

Anm. zu 1.) d.:

Konrad Wachsmann machte in den 1950er Jahren im Zusammenhang mit der Konstruktion von Flugzeughangars den Vorschlag, die Rohrrahmenkonstruktion der großformatigen Hangartore zur Speicherung von Pressluft zu nutzen. Mit Hilfe dieser Pressluft sollten Pressluftmotoren an den Radsätzen der Toranlage betrieben werden. Wachsmann: Wendepunkt im Bauen, 1959, S. 164

Anm. zu 2.):

Als positiver Effekt der luftdichten Verschließung von Rohrkonstruktionen wird im Brandfall die eingeschlossene, gespannte Luft gesehen, die die Form stabilisieren würde. Es ist aber nicht ersichtlich, in wieweit dieser Ansatz rechnerisch und konstruktiv berücksichtigt wurde und zutreffend ist, da die Erweichungstemperatur von Stahl schnell erreicht ist und der Innendruck die Membranspannungsfestigkeit übersteigt. Vgl.: Köhler: Merkblatt 224, 1975, S. 27

dem Innen- und Außenraum sehr stabil (z.B. Vakuumtransportsysteme oder Hochdruckleitungen).

2.) Brandschutz:

- a. Die Feuerwiderstandsdauer ist unter anderem von der brennbaren Oberfläche eines Stahlprofils abhängig und fällt gegenüber den offenen Profilen mit vergleichbaren statischen Eigenschaften günstig aus.
- b. Die unter 1)c. genannte Stahlverbundbauweise erhöht durch die erhöhte thermische Trägheit die Feuerwiderstandszeit deutlich gegenüber unverfüllten Hohlprofilen. 2.) d. kann in diesem Sinne auch zur aktiven Kühlung im Brandfall durch zirkulierendes Wasser genutzt werden.
- c. Intumeszierende Beschichtungssysteme können wirkungsvoll und einfach appliziert werden und im Zuge der notwendigen Erneuerung kostengünstig ersetzt werden, siehe hierzu auch die Aspekte unter 4.) a.

3.) Aerodynamik bzw. Hydrodynamik:

- a. Die kreiszylindrische Mantelfläche ist ihrer Form nach in den strömenden Medien Luft und Wasser mit sehr günstigen Beiwerten berücksichtigt, was zu einer geringeren Beanspruchung von Hochbauten und Offshore-Konstruktionen aus Hohlprofilen gegenüber offenen Profilen führt. Die Oberflächenrauigkeit lässt sich aufgrund der beschichtungsfreundlichen Formgestalt fein steuern.
- b. Die kreiszylindrische Innenfläche ist strömungstechnisch auch zur verlustarmen Leitung von Medien wie in 1.) d. sehr gut geeignet.

4.) Korrosionsschutz:

- a. Beschichtungssysteme zum Korrosionsschutz, sowohl im Kalt- als auch im Heißverfahren lassen sich auf der Außen- und Innenfläche gut und mit gleichmäßiger Schichtdicke applizieren; mechanische Vorbereitung zum Haftverbund durch Strahlen und Schleifen ist auf der Mantelfläche einfach, die Rohrrinnenseite dagegen schwierig zu erreichen. Es hat sich aber erwiesen, dass auf einen innenseitigen Korrosionsschutz vollständig verzichtet werden kann, wenn die Rohrenden dauerhaft luftdicht verschlossen werden.
- b. Die dem Beschichten dienliche Gestaltform ist auch für die Standzeit von Beschichtungssystemen vorteilhaft, da Schmutz- und Feuchtigkeitsfilmbildung weniger stark ausgeprägt ist als bei offenen Profilen mit ihren Kanten.

5.) Instandhaltung:

- a. Der Zustand von Hohlprofilen lässt sich nach dem Augenschein im Bereich der Mantelfläche gut beurteilen, da Formabweichen herausstechen und die Geometrie sich aus einer 360°-Ansicht einfach erfassen lässt.
- b. Die unter Korrosionsschutz aufgeführten Aspekte sind auch bei der Ausbesserung oder Neubeschichtung hilfreich.

- c. Besondere Anforderungen in der Hygiene und an die Gefahrenabwehr sind durch gute Desinfizierbarkeit, Dekontamination oder die Vermeidung von explosionsförderlichen Ansammlungen zur Verhütung von Staubexplosionen in der Textilindustrie oder bei Großmühlen bei Rohren erfüllt.
- 6.) Ästhetik und Ergonomie:
- a. Die Ergonomie kommt vor allem bei rein konstruktiven Anwendungen bis zu einem Durchmesser von ca. 60,3 mm Außendurchmesser zum Tragen, da Stahlrohrmöbel, Gebrauchsgegenstände und Elemente der Verkehrssicherung in Gebäuden, wie Handläufe aus Rundrohr, dem Greifprofil der menschlichen Hand entsprechen.
 - b. Die Ästhetik lässt sich schwer einer sachlichen quantitativen Bewertung zuführen. Der Zylinder, als äußere Erscheinungsform, weist aber Eigenschaften auf, die qualitativ beschreibbar sind:
 - i. Die gleichförmig gekrümmte Oberfläche wird bei matter Oberflächenbeschaffenheit mit dem Auge als kontinuierlich sich ändernder Helligkeitsverlauf wahrgenommen, der bei gleichzeitiger Bewegung der Lichtquelle und des Beobachters konstant bleibt oder bei Veränderung dieser Disposition sich ebenfalls ändert; es stellt sich eine plastische Wahrnehmung ein.
 - ii. Die Mantelfläche, beschreibbar durch den Kreisumfang, hat die transzendente Zahl π zur Grundlage und ist somit diskret nicht erfassbar. Die Entität Zylinder ist ein Beispiel für die Diskrepanz zwischen mathematischer und physischer Realität – der Zylinder wird selbst zum materiellen Träger von Transzendentalität.
 - iii. Rohre wurden als innovative Halbzeuge, vor allem durch den Stahlrohrmöbelbau ab den 1920er Jahren, breitenwirksam wahrgenommen und kommen auch in zeitgenössischen Zukunftsprojektionen als Konstruktionselement z. B. im Science-Fiction Bereich vor.

8.5.2 Die Fügung von Hohlprofilen

Demgegenüber stellen, bei Betrachtung von ganzen Tragsystemen, die geometrischen Eigenschaften des Hohlprofils eine Herausforderung dar. Die Fügung von Hohlprofilen im Ingenieurbau untereinander ist erst mit der Einführung des maschinellen Brennschneidens und Schweißens form- und materialgerecht möglich. Die Ausformung von Verbindungsknoten berücksichtigt dabei mehrere Gesichtspunkte:

Anm. zu ²¹:

Der Gütegrad einer Knotenverbindung wird definiert als das Verhältnis der Bruchkraft des Knotens zu Zugfestigkeit des Zugstabes in Rohrbauweise. o.A.: Mannesmann Stahlrohrbau, 1955, S. 65

- 1.) Die Umlenkung von Stabkräften ist unter Beachtung der Schnittpunkte der Schwerachsen generell sinnvoll. Bei Rohrkonstruktionen wird aber ein Gütegrad²¹ von 100% erst durch einen negativen Fehlhebel erreicht. Die Diagonalen verschneiden sich gegenseitig mit den Gurtrohr, was komplexe Verschneidungsgeometrien bedingt.
- 2.) Eine lokale Erhöhung der Steifigkeit kann nicht problemlos durch zusätzliche Stegbleche wie bei den offenen Profilen erreicht werden. Trotz des günstigen lokalen Beulwiderstandes sind sich verschneidende Rohre deutlich unterschiedlicher Quermesser zu vermeiden. Das Verhältnis Diagonale zu Gurtrohr sollte 1:4 nicht überschreiten.
- 3.) Eine umlaufende Schweißnaht wird nicht nur von der Bemessung gefordert, sie dient auch dem luftdichten Abschluss gegen Innenkorrosion. Die Wärmeeinflusszonen liegen gemäß 1.) dicht beieinander und setzen besondere Eignungsnachweise des Schweißtechnikern voraus.

Büttner & Hampe²² sehen den Einfluss des Querschnittes (Abb. VIII. 9) auf die Tragqualität und Tragstruktur auch als wesentlich, geben aber genauso zu bedenken:

„Der Entwurf des Stabquerschnittes entscheidet aber auch mit über den Bauaufwand und damit über die ökonomische Qualität des Tragwerkes.“²³

Daher sollte die Tragqualität des Profils mit seinen konstruktiven Anschlussmöglichkeiten abgewogen werden. Büttner & Hampe geben folgende Größen zur Kennzeichnung der Tragqualität von Stabquerschnitten vor:²⁴

- i) *die Biegesteifigkeit*
- ii) *die Torsionssteifigkeit*
- iii) *die Schubsteifigkeit*

Das Flächenträgheitsmoment ist seinem Wesen nach steuerbar:²⁵

- a) *durch die Querschnittsform (rund, quadratisch, rechteckig usw.)*
- b) *durch die Querschnittsgliederung (voll, hohl, i-förmig usw.)*
- c) *durch die Flächenverteilung (ausgeprägter Gurt, dünner Steg usw.)*

²¹ Siehe: o.A.: Mannesmann Stahlrohrbau, 1955, S.65

²² Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985, S. 25:

²³ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985, S. 25:

²⁴ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985, S. 25

²⁵ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985, S. 25

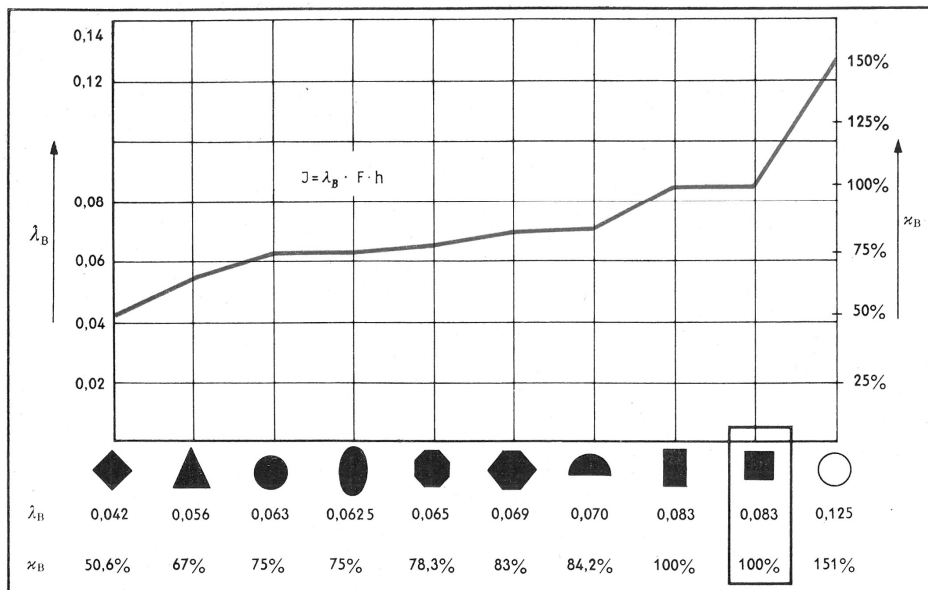


Abb. VIII. 9: Einfluss der Querschnittsform auf das Flächenträgheitsmoment eines Stabes ($F=\text{const.}$), nach Büttner & Hampe

Wurden zu Beginn noch die Eigenschaften der Gussstützen als Komplementär zu den tradierten Bauformen der Stützen vergleichend herausgestellt, ist Prof. Schnietes Vergleich aus den 1930er Jahren (Abb. VIII. 5) der Endpunkt dieser Entwicklung. Obwohl das nahtlose Rohr hier noch in der Zeichnung fehlt, so hatte sich seine Stellung auch gleich relativiert und musste sich nun als eine Alternative innerhalb der Walzprofilserien behaupten, die jetzt keine grundsätzlichen Unterschiede im Werkstoff selbst mehr aufwiesen.

Hatte es die Mannesmann-Röhren-Werke AG verstanden, das nahtlose Rohr für Hochbauten mit den Röhrentürmen erstmals zu promoten, so standen die zuvor genannten Einschränkungen des Bauaufwandes und ein höherer Meterpreis der breiten Anwendung entgegen.

Mit der systematischen Weiterentwicklung der Schweißtechnik im konstruktiven Stahlbau wurden bereits in den 1940er Jahren Grundlagen geschaffen, die die material- und geometriegerechte Fügung von Rohren erst ermöglichte. Konnten die neuen, offenen Walzprofile auch mit der Niettechnik über Bleche miteinander kraftschlüssig verbunden werden, und somit Teil der zusammengesetzten Konstruktionen, wie der Fachwerkdachbinder oder der Rahmenbauweise werden, war dagegen das Stahlrohr ungleich ungünstiger für Nietverbindungen.

„Hohlquerschnitte sind hinsichtlich ihrer statischen Werte und vom Gewicht her besonders günstige und wirtschaftliche Bauformen. Dies ist seit 100 Jahren bekannt, doch konnten sie sich bei der alten Nietbauweise nicht durchsetzen, da sie umständlich herzustellen und zu unterhalten waren.“²⁶

Anm.:
Siehe hierzu das Kapitel
8.6.2 u. 8.6.3.

²⁶ Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983, S. 1

8.5.3 Erste Werkstoffe für Hohlprofile

Anm.:
 Der Werkstoff RHB 36 wurde von Mannesmann mit folgenden Kennwerten beschrieben bei $3 \text{ mm} < t < 7 \text{ mm}$:
 Streckgrenze:
 $41,5-52,7 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ [sic]
 Bruchgrenze:
 $62,3-69,6 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$ [sic]
 Dehnung:
 20-25%
 o.A.: Mannesmann Stahlrohrbau, 1955, S. 29

Als Hemmnis für die Verwendung von Rohren in den 1940er Jahre wird aber die Begrenzung²⁷ der Werkstoffe auf St37.12 für Profile und St37.21 für Bleche genannt, die sich nicht mit den Rohrwerkstoffen St35.29 und St55.29 deckten. Die Beschränkung des C-Gehaltes auf unter 0,2% sollte für den konstruktiven Hochbau die Schweißbeignung sicherstellen, und die Qualitätssicherung für Baustahl sah auch die Angabe der Streckgrenze vor, was bei den Rohrwerkstoffen nicht der Fall war. Es fehlte an einem Rohrwerkstoff mit geeigneten Kennzahlen für die Streckgrenze und der temperaturabhängigen Kerbschlagzähigkeit, dessen Schweißbeignung unter Verwendung zugewiesener Schweißelektroden nachweißbar war. Mannesmann entwickelte mit dem Feinkornstahl RHB 36 einen Röhrenwerkstoff, der diesen Anforderungen gerecht wurde und nach DIN 1050²⁸ den zulässigen Spannungen des St52 entsprach.²⁹

Aber erst mit der Einführung der DIN 4115 *Stahlleichtbau und Stahlrohrbau im Hochbau*³⁰ wurde ein Normenwerk vorgelegt, das die besonderen konstruktiven Potenziale der Röhrenkonstruktionen berücksichtigte und die DIN 4100³¹ sinnvoll ergänzte.

8.5.4 Das Hohlprofil in der Vermarktung

Es ist daher nicht verwunderlich, dass auch die Publikationen mit der Konsolidierung der deutschen Stahlindustrie nach dem zweiten Weltkrieg zunahmen, in denen das Stahlrohr für konstruktive Aufgaben empfohlen wurde, da diese Grundlagen noch relativ neu waren.

Eigene Lobbyverbände wie die Beratungsstelle für Stahlanwendung (Abb. VIII. 10) oder Konzerne (Abb. VIII. 11) führten dabei eine bekannte Strategie, die der sachliche Produktinformationen erweitert um Anwendungsbeispiele im Substitutions- oder Neuanwendungsbereich, professionalisiert fort.

²⁷ Siehe: o.A.: Mannesmann Stahlrohrbau, 1955, S. 26

²⁸ Siehe: DIN 1050: Stahl im Hochbau, 1946

²⁹ Siehe: o.A.: Mannesmann Stahlrohrbau, 1955, S. 54

³⁰ Siehe: DIN 4115: Stahlleichtbau, 1950

³¹ Siehe: DIN 4100: Geschweißte Stahlhochbauten, 1956



Abb. VIII. 10: Beispiel für Handreichung für neue Anwendungsgebiete von Stahlrohren, Merkblatt für Spielplatzgeräte aus Stahlrohr, 1954

Es greift aber zu kurz, diese Entwicklung auf ihre Erzielung höherer Absätze zu reduzieren. Tatsächlich war die Innovationskraft für stabförmige Tragwerke aus dieser Richtung kommend nicht zu unterschätzen, wurden hier doch Brücken zu den anderen konstruktiven Disziplinen geschlagen, die Rohre konstruktiv schon länger verwendeten.

Das Bauwesen unterliegt einem besonderen Verhältnis zu Innovationen und Optimierungen im Vergleich zu den anderen konstruktiven Bereichen, da sich die Nutzungsanforderungen an Gebäude in langsameren Zyklen ändern und bekannte Bautypologien häufig eine gewisse Resilienz gegenüber Änderungszwängen aus Nutzungsänderungen aufweisen. Die Erstellung von immobilien Langzeitprodukten mit möglichst geringem Wartungsaufwand und hohen Sicherheiten in Tragvermögen und Stabilität bei gleichzeitig kostengünstigen Ausgangsmaterialien bzw. Halbzeugen, zeigt daher ein eher konservatives Verhalten gegenüber der Einführung neuer Werkstoffe und Produkte.

Zu Abb. VIII. 10:
Weitere Titel der Merkblätter der Beratungsstelle für Stahlanwendung in den 1950er Jahren waren:
Ausstellungs- und Werbebauten aus Stahlrohr, lfd. Nr. 107, 1954; o.A.: Merkblatt 107, 1954;
Zerlegbare Tribünen aus Stahlrohr, lfd. Nr. 108, 1954; o.A.: Merkblatt 108, 1954 und das hier abgebildete; o.A.: Merkblatt 109, 1954

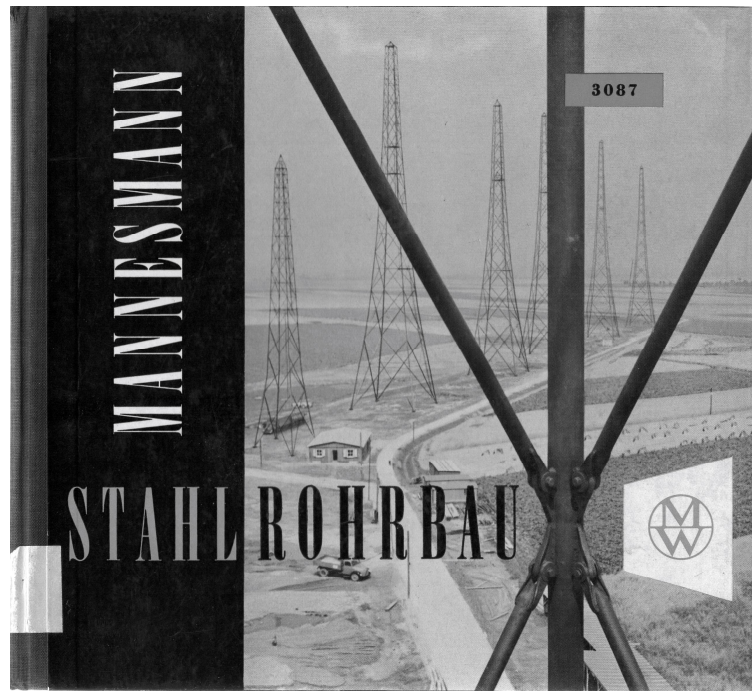


Abb. VIII. 11: Produktinformation der Mannesmannröhren-Werke AG, 1955

Zudem werden Produktionskapazitäten daher häufig für die serielle Massenproduktion ausgelegt, die in der Normierung der Produkte einen Garanten für lange Produktzyklen fanden.

8.6 Impulse aus dem Maschinen- und Anlagenbau für Hohlprofilkonstruktionen

Demgegenüber ist der Einfluss aus den konstruktiven Bereichen des Maschinen- und Anlagenbaus ein wichtiger Impulsgeber für zunächst Sonderkonstruktionen im Bauwesen oder serielle Produkte am Übergangsbereich der beiden Konstruktionsdisziplinen, wie zum Beispiel der Gerüstbau oder Kranbau. Die neuen Aspekte einer erweiterten Funktionalität können selbst zur Erweiterung der Bewertungsmaßstäbe im Bauwesen werden, die im Fall der Baugerüste zu einer neuen Qualität von lösbaren Verbindungen führte oder höherwertigen Stählen aus dem Kranbau zur Folge hatten.

8.6.1 Ein früher Ausblick

Das Mannesmann-Rohr wird bereits in den 1890er Jahren als disruptive Technologie eingeschätzt, die sich nicht nur auf den Hochbau und den Tiefbau beschränkt. Neben den zu erwartenden Effizienzpotentialen im wirtschaftlichen Sinne, ist es besonders das Militär, das die Verwendung in der Kriegstechnik allgemein und in der Kriegsmarine im Besonderen prüft. 1893 erscheint in den *Mitteilungen aus dem Gebiete des Seewesens* ein umfassender Artikel³², der das „*eigentümliche Walzverfahren*“ mit Bezug auf Prof. Franz Reuleaux (1829-1905) einführend vorstellt. Die Kriegsmarine hatte sich zum technischen Vorreiter entwickelt, da hier anspruchsvolle Waffensysteme zur Anwendung kamen, die eine Applikation des nahtlosen Rohres nicht auf Geschützrohre beschränkt sah. Die bereits vollzogene Umstellung auf Dampfschiffe mit Propellerantrieb, hydraulische Anlagenteile und die neue Torpedowaffe erforderten leichte Hochdruckrohre und Druckbehälter verschiedenster Durchmesser und Wandstärken, die höchsten Qualitätsansprüchen genügen mussten. Der militärische Berichterstatter sieht im Herstellungsprozess selbst schon einen wesentlichen Qualitätsgaranten, da sich nur fehlerfreie Stahl-Ingots einer Verarbeitung durch das Schrägwalzverfahren zuführen ließen. Die angewendeten Siemens-Martin-Stähle erreichen danach Festigkeiten von 70-75 kg/mm² gegenüber den Schweißrohren mit 30-40 kg/mm² und können bei üblichen Rohrdurchmessern in unbekannter Länge von bis zu 21 m produziert werden. Ein besonderer Aspekt des Walzverfahrens sei es, dass man Hochdruckgasflaschen, sogenannte *Mannesmann-Flaschen*, für Drücke bis ca. 250 at, in einem Stück herstellt. Insgesamt wird die Eignung zur Nachbearbeitung hervorgehoben, sei es das Gewindeschneiden, Umformen

Anm.:

In der Deutschen Bauzeitung erschien bereits 1891 ein längerer Artikel unter dem Titel *Das Mannesmann-Rohr in seiner Bedeutung für das Kunstgewerbe* mit ganzseitiger Bildbeilage. Der Autor sieht im Mannesmann-Rohr ein Vorprodukt für Kunstschmiedearbeiten, das durch seine Plastizität und Streckbarkeit zu einem *unabänderlichen Eisenstile, nämlich dem Stile, welcher dem Material innewohnt*, führen werden würde. Siehe S. 419



Abb. VIII. 11a: Geschmiedete Schmuckformen aus Mannesmann-Rohr, 1891
Aus:
Schlenning: Mannesmann-Rohr im Kunstgewerbe, 1891, S. 417ff

³² Schwanda: Mannesmannrohre in der Kriegstechnik, 1893, S. 302-335

oder einfache Kalibrieren durch zerspanende Bearbeitung. So wird auch ein Träger von gleicher Festigkeit vorgeschlagen:

„Die Herstellung dieses Trägers ist auch eine hervorzuhebende Errungenschaft des Mannesmann-Walzverfahrens. Da nämlich eine nachträgliche Bearbeitung der Mannesmann-Rohre sehr leicht möglich ist, kann man aus den Rohren auch Balken von Rechteckquerschnitt herstellen, deren Gürtelfläche (obere und untere Seiten) eine größere Dicke besitzen als die Seitenwände und deren Wandstärke an beiden Enden gegen die Längenmitte zu allmählich zunimmt.“³³

8.6.2 Adaption durch die Kriegsmarine

Klaus Bach konnte in seiner Studie über *Gittermaste amerikanischer und russischer Schlachtschiffe*³⁴ Turmbauweisen aus Röhren identifizieren, die in der Kriegsmarine um die Jahrhundertwende des 20. Jahrhunderts zur Aufständigung der Messplattformen der Artillerie dienten. Die Mars war ein erhöhter Beobachtungsposten mit optischen Messgräten zur Peilung und Entfernungsmessung von Zielen, der den Gesichtskreis auf Grund der Standpunkthöhe gegenüber dem Augenhorizont deutlich erweiterte. Bach entnimmt seinen Quellen folgende Kriterien für Maste von Marsen, die gegeneinander abzuwägen seien:³⁵

- 1.) „große Höhe bei geringem Gewicht (Toplastigkeit)“
- 2.) „Vibrationsfreiheit (schnelllaufende Dampfmaschinen und später Turbinen samt Getrieben machten Schwingungsprobleme)“
- 3.) „unbeeinträchtigte Sichtmöglichkeit (Rauch, Schlieren erhitzter Luft, Pulverqualm)“
- 4.) „Stabilität (Seegang, Wind, Druckwellen der Geschütze)“
- 5.) „Standfestigkeit unter Beschuss“

Diese Bedingungen führten in der zaristischen Kriegsmarine schon 1903 zum Konzept der dreiachsigen, hyperboloiden Gittermasten aus Röhren, z.B. bei der *Imperator Pavel I*, die eine Höhe von 24 m auf elliptischen Querschnitt erreichten (Abb. VIII. 12).

³³ Siehe: Schwanda: Mannesmannrohre in der Kriegstechnik, 1893, S. 333

³⁴ Bach: Gittermasten, 1990

³⁵ Siehe: Bach: Gittermasten, 1990, S. 104

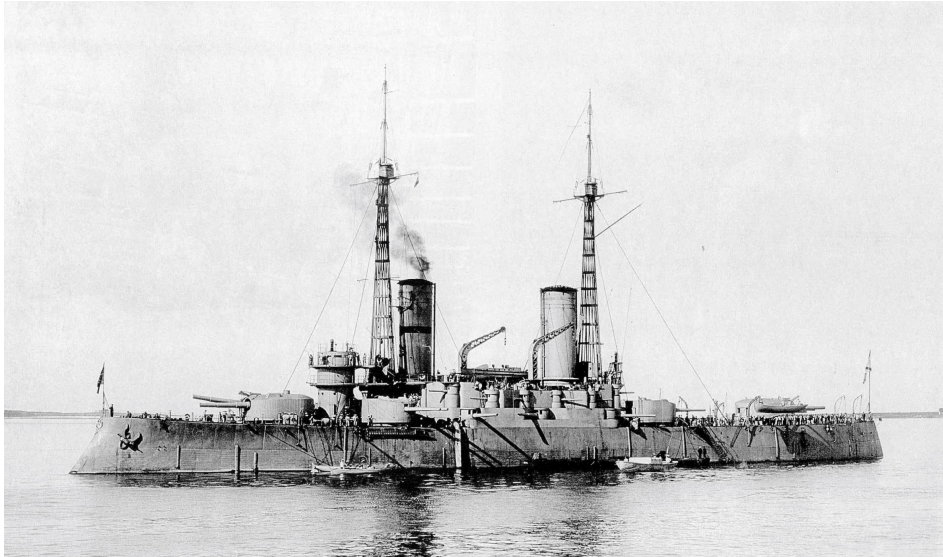


Abb. VIII. 12: Imperator Pavel I mit Groß- und Vormars auf hyperboloiden Gittermasten aus Rohren, 1912

Konnte in der Studie über Gittermasten die Herkunft der Röhren nicht geklärt werden, fallen sie aber in einen Zeitraum, in dem das Bewusstsein um die Vorteile der nahtlosen Stahlrohre entwickelt war, und diese weltweit lieferbar waren.

Tatsächlich sollten sich viele der projizierten Anwendungen aus dem Aufsatz über Mannesmannrohre in der Kriegstechnik in den kommenden Jahren als Serienprodukte etablieren.

Der Mannesmann-Katalog³⁶ umfasste 1912 z.B. dann auch eine Bandbreite, die neben den Rohren für Leitungszwecke oder Konstruktionszwecke auch erwähnte Gasflaschen, Telegraphenmaste und Bohrröhren umfasste, so dass man nicht mehr von einem Röhrenhersteller, sondern von einem Technologiekonzern sprechen musste.

Zu ³⁶:
Kohlensäureflaschen bis
250 at, S. 61,
Telegraphen- u. Telefon-
stangen, S.92
Nahtlos gewalzte Mannes-
mannbohrröhren, S. 268

8.6.3 Frühe Röhrentürme und andere Objekte aus Stahlrohren

Der im Kapitel 7.11 besprochene Aussichtsturm auf der Büchenbronner Höhe bei Pforzheim von 1883 entstand am Vorabend der nahtlosen Rohre nach dem Mannesmann'schen Verfahren bereits unter Verwendung von gekrümmten Schweißrohren für das äußere Traggerüst.

Das kontinuierlich pressgeschweißte Schweißrohr, auf der Grundlage des Patentes Cornelius Whitehouse (1795-1883) vom 26. Februar 1825, bildete den bedeutenden Komplementär zu den Gussrohren für die industrielle Fertigung von gasdichten Rohren für die wachsenden Gasbeleuchtungsnetzwerke. Der duktile Werkstoff gestat-

³⁶ Siehe: Mannesmann: Preislisten, 1912

tete es, Rohrbögen insitu zu erstellen und die Rohre passgenau abzulängen, da Außengewinde an den glatten Rohrenden aufzuschneiden waren, was die Gussrohre mit ihren Flanschen nicht gestatteten.

Vor dem Patentverfahren von Whitehouse waren zur Herstellung von schmiedeeisernen Rohren zeitintensive Arbeitsschritte notwendig. Die schmiedeeisernen Bleche mussten in einem ersten Schritt gekrümmt werden, und wurden im zweiten Schritt mit dem Hammer unter Glut verschweißt. Die erreichbare Länge war so max. 4 Fuß. Neben der Gasversorgung war es vor allem die Dampfmaschine, die jetzt höhere Ansprüche an die Verarbeitung bzw. Druckfestigkeit stellen sollte.

Albert Poensgen (1818-1880) hatte das Verfahren nach Whitehouse in England kennengelernt, und zur Grundlage einer eigenen Produktion von Schweißrohren bei Mauel genommen. Schon im zweiten Jahr der Produktionsaufnahme, 1846, wurden 800 Zentner Gasröhren produziert.³⁷ In der Folge war man nicht mehr alleine auf Importe aus England angewiesen, wenn auch die zahlreichen Zollgrenzen bis 1871 den Vertrieb im deutschsprachigen Raum erschwerten.

Ab Mitte des 19. Jahrhunderts war das Schweißrohr bzw. das Siederohr ein etabliertes Rohrleitungsprodukt, das im Vergleich zu den älteren Gussrohren leichter und formbar war. Die lieferbaren Querschnitte deckten schwerpunktmäßig den Bereich bis zwei Zoll ab.

Eduard Mäurer schreibt in seinem Buch *Die Formen der Walzkunst und das Façoneisen* von 1865 dazu:

*„Der hohe Grad von Steifigkeit, welcher auch dieser hohlen Querschnittsform eigenthümlich ist, empfiehlt dieselbe zur Anwendung an Säulen, Telegraphenstangen, besonders aber zu Gitterstangen, Diagonalstäben u. für eiserne Brücken“*³⁸

Diese Eigenschaften eröffneten beispielhaft neue Anwendungsgebiete im Anlagenbau, die mit der Entwicklung neuer Technologien der Industriegesellschaften aufkamen:

- 1.) Telegraphen- und Beleuchtungsmaste (letztere für Gas- oder folgend elektrische Beleuchtung)
- 2.) Windkraftanlagen zur Wasserförderung (folgend zur Stromgewinnung) Abb. VIII. 13

³⁷ Siehe: Hatzfeld: Anfang der Deutschen Röhrenindustrie, 1960, S. 249

³⁸ Mäurer: Walzkunst, 1865, S. 172

3.) Wassertürme bzw. Hochbehälter³⁹

4.) Fördergerüste und Bohrtürme bzw. Bohrgestänge

Die Qualitätsansprüche an das Rohrmaterial und die Wirtschaftlichkeit waren in den einzelnen Anwendungsfällen sehr unterschiedlich. Die Telegraphenmasten ließen sich weiterhin aus günstigen konventionellen Rundhölzern errichten, sodass zunächst ein Masttyp aus Schlitzrohr⁴⁰ der Friedrich-Wilhelmshütte bei Siegburg, ab 1860 zum Einsatz kam, bei dem aus Kostengründen auf eine Pressverschweißung verzichtet wurde. Die Braunschweiger Eisenbahn verwendete nach Mäurer einen Telegraphenstangen-Typ für die Strecke Holzminden-Kreienzen aus der Hermannshütte⁴¹ bei Hörde, die aus zwei Halbzylinderschalen mit Flanschen zusammengesetzt wurden. Der Zusammenbau erfolgte durch Verschraubung oder Nietung, und der äußere Durchmesser von $4\frac{7}{8}$ Zoll gestattete es, dass man auskragende Sprossen zum Ersteigen der Maste einfügen konnte. Diese Façoneisen waren bis zu 12 m Länge lieferbar.

Komplexere Tragstrukturen, für z.B. Windmühlen, konnten von den Schweißrohren in höherem Maße in zweierlei Hinsicht profitieren, erstens, da die Rohrform nicht nur knicksteifer war als die üblichen leichten L-Winkel, sondern, zweitens das Rohr in Form von Wellen zur Kraftübertragung auch seine Torsionssteifigkeit nutzte.



Abb. VIII. 13: Gitterturm aus Rohren für Windmotor „Herkules“ der Fa. Windturbinen-Werke Dresden, 1899

Diese Eigenschaft war besonders für die sich entwickelnde Mineralölprospektion und Exploration von großer Bedeutung, da hohle Bohrgestänge

Zu ³⁹:

Nach Rainer Graefe meldete der russische Ingenieur Šuchov 1896 ein Patent für Traggerüste in Form eines Hyperboloiden an, der auf Grundlage von geraden Stäben ein räumliches Tragverhalten zeigt. In der Patentschrift werden verschiedene Materialien und Profiltypen als geeignet genannt, unter anderem Rohre.

³⁹ Graefe/Gappoev et al.: Šuchov, 1990, S. 177

⁴⁰ Siehe: Mäurer: Walzkunst, 1865, S. 172

⁴¹ Siehe: Mäurer: Walzkunst, 1865, S. 172

stänge zur Spülung bzw. Förderung entwickelt wurden, die beim Erschließen der Lagerstätten in zunehmender Tiefe große Torsionskräfte auf den Bohrkopf übertragen mussten.

Die Entwicklung des nahtlosen Stahlrohres der Brüder Max Mannesmann (1857-1915) und Reinhard Mannesmann (1857-1922) übertraf die Schweißrohre in technischer Hinsicht in allen Aspekten, und war für die Weiterverarbeitung zu Klein- und Präzisionsrohren durch Kaltziehen ein besseres Ausgangsmaterial als die Schweißrohre. Es waren vornehmlich der deutlich höhere Preis und die anfänglichen Produktionsschwierigkeiten, die eine quantitative Marktbeherrschung bis Ende der 1890er Jahre verhinderten.

Es kann vermutet werden, dass die Brüder Mannesmann und ihre wirtschaftlichen und technischen Berater sich dessen bewusst waren, und öffentlichkeitswirksame Musterkonstruktionen aus Mannesmannrohr als Demonstratoren der Leistungsfähigkeit und Verfügbarkeit ihres Produktes suchten. In diesem Kontext kann man die um ca. 1892 entstandenen Vorentwürfe von *Röbrentbürmen* einordnen, die als zivile Aussichtstürme (Abb. VIII. 14, links und mittig) dem Beispiel der Büchenbronner Höhe von 1883 folgen, oder der militärischen Fernerkundung dienten (Abb. VIII. 14, rechts)⁴².

Zu Abb. VIII. 14:

Der rechte Turm stellt nach Burkhardt vermutlich einen Vorentwurf für einen 400 m hohen militärischen Fernerkundungsturm in Dänemark dar, der in einer privaten, vertraulichen Korrespondenz zwischen Reinhard Mannesmann und seinem Vetter Dr. Fritz Kogel erwähnt wird:

„[...] Als secret teile ich Dir noch mit, was aber Professor Steiner und niemand von unserem Berliner Büro wissen darf, daß nach einer mir von Oberstleutnant Wagner gemachten Mitteilung in Kopenhagen ein vierhundert Meter hoher Aussichtsturm für militärische Zwecke errichtet werden soll, wozu wir auf Veranlassung des Herrn Oberstleutnant v. W. mit einer belgischen und französischen Gesellschaft zur Konkurrenz gezogen werden. Sobald wir die nächsten Daten wissen, kann Herr Professor Steiner an die Ausarbeitung dieses Projektes gehen [...]“

Archivale Mannesmann: Dr. Fritz Kogel, 1892

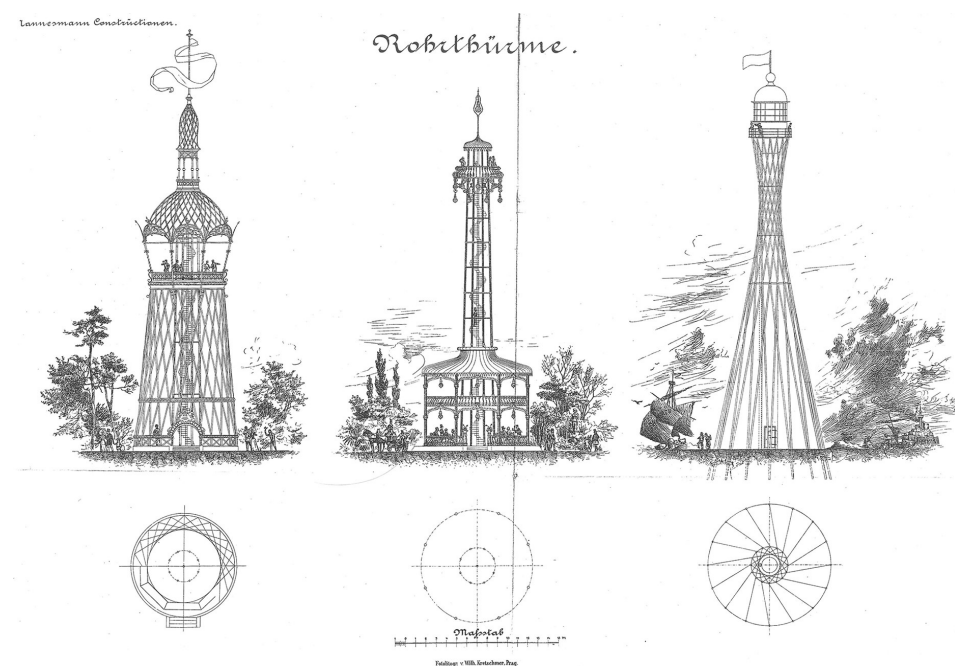


Abb. VIII. 14: Rohrthürme [sic] der Fa. Mannesmann aus nahtlosem Stahlrohr unrealisiert, vermut. 1892

⁴² Siehe: Burkhardt: Eiserne Rohrkonstruktionen, 1991, S. 158f

Berthold Burkhardt hat in seinem Artikel *Eiserne Rohrkonstruktionen im 19. Jahrhundert*⁴³ die unausgeführten Mannesmann'schen *Röhrentürme* mit Rückgriff auf das umfangreiche Firmenarchiv dem Fachpublikum vorgestellt und ihre strukturelle Ähnlichkeit mit den Šuchov'schen Wassertürmen in Bezug gesetzt.

Es kann vermutet werden, dass die Ausführung neben der Kostenhöhe auch wegen ungeklärter Detailausbildung der Knotenpunkte unterblieb. Das bei der Büchenbronner Höhe angewendete Klemmmuffen-Detail aus Gusseisen wurde schon zeitgenössisch als nicht materialgerecht bewertet, und die Verschraubung mit Hilfe von Schraubmuffen gewährleistete nur eine kraftschlüssige Verlängerung, und war zur Ausbildung von Knotenpunkten in dieser Form ungeeignet.

⁴³ Burkhardt: *Eiserne Rohrkonstruktionen*, 1991

8.7 Hohlprofile als Systembauelemente im Leichtbau

Vor diesem Hintergrund war in den konstruktiven Disziplinen ein breites Anwendungsfeld für nahtlose Stahlrohre entstanden, das das Bauwesen als einzige Disziplin bis zur Einführung der DIN 4415⁴⁴ noch nicht voll aus schöpfen konnte. Diese Gemengelage aus dem sachlichen Informationsbedarf der Konstrukteure im Bauwesen und den wirtschaftlichen Interessen der Röhren-Industrie, brachte eine Vielzahl von Publikationen hervor, die ein Spiegelbild der vielschichtigen Aspekte um die besondere Eignung der Rohre im konstruktiven Hochbau und im allgemeinen Leichtbau sind.

Tafel 15 Kennwerte für Knickstäbe aus Stahlprofilen von 500 cm Länge, beiderseits gelenkig gelagert, bei etwa gleicher Fläche und etwa gleichem Gewicht (zu beachten ist die unterschiedliche Knickzahl gemäß Zeile 8). Die Angaben in Zeile 12 für Anstrichflächen gelten für die Kalkulation einer Anstrich-Erneuerung

1	Form	○	□	□	□	IPBL	IPB	II	IPE	□	□
2	Profil	152,4x6,3	120x6,3	2 □ 100	2 L 75.10	120	100	2 I 120	200	□ 180	2 L 75.10
3	F cm ²	28,9	28,0	27,0	28,2	25,3	26,0	28,4	28,5	28,0	28,2
4	J _y cm ⁴	773	598	380	210	231	167	281	142	114	143
5	W _y cm ³	101	99,7	76	56	39	34	49	29	23	27
6	i _y cm	5,17	4,62	3,75	2,73	3,02	2,53	3,14	2,24	2,02	2,25
7	P _{max} Mp	24,8	19,2	12,6	7,0	7,6	5,50	9,30	4,00	3,80	4,70
8	$\frac{100 P_{\max}}{P_{\max \text{ Rohr}}} \%$	100	77,4	51	28	31	22	38	16	15	19
9	ω für St 37	1,64	1,97	2,99	5,66	4,65	6,62	4,27	8,40	10,30	8,32
10	$\sigma_d = \frac{P}{F} \text{ kp/cm}^2$	855	685	467	248	300	212	327	142	135	168
11	G kp/m	22,8	22,0	21,2	22,2	19,9	20,4	22,2	22,4	22,0	22,2
12	Anstrich- fläche $\frac{\text{m}^2}{\text{m}}$	0,479	0,465	0,400	0,312	0,667	0,567	0,570	0,768	0,611	0,432

Abb. VIII. 15: Gegenüberstellung von jeweils 9 Kennwerten verschiedener Walzprofile als Pendelstab von 5 m Länge, 1975

8.7.1 Darstellungsformen der Attribute von Hohlprofilen

Es werden je nach Aussageabsicht verschiedene Perspektiven eingenommen: Die getroffenen Aussagen über Hohlprofile werden entweder an isolierten Kennwerten, wie z.B. dem Flächenträgheitsmoment (Abb. VIII. 8) oder der systemabhängigen Traglast (Abb. VIII. 16) und in der synoptischen Übersicht (Abb. VIII. 15), getroffen.

⁴⁴ DIN 4114: Stabilitätsfälle, 1952

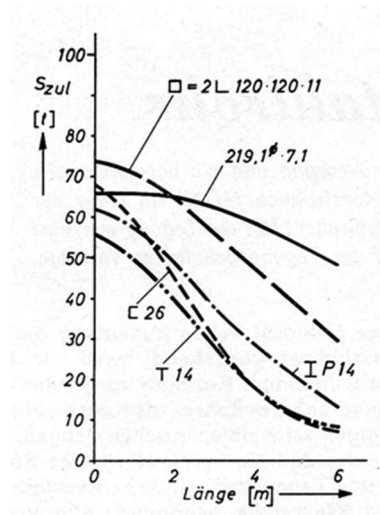


Abb. VIII. 16: Zulässige Druckkräfte einiger Stabquerschnitte bei ungefähr gleichem Mettergewicht, 1959

Als anschauliche Darstellungsform wird die Tabelle oder das Diagramm gewählt, was die Nachvollziehbarkeit der sachlich getroffenen Aussagen erleichtert, aber über den kontextual begrenzten Zusammenhang hinwegtäuschen kann. Adressat ist in erster Linie der Konstrukteur, der schon in seinem Studium mit der Vielfalt von konstruktiven Lösungen hierdurch eine qualitative und quantitative Orientierung erhält.

8.7.2 Zeitgenössische Rezeption und Diskussion

Es ist aber bemerkenswert, dass die verbreiteten Publikationen Neuferts, die *Bauentwurfslehre*⁴⁵ (BEL) und die *Bauordnungslehre*⁴⁶ (BOL), dem Rohr im konstruktiven Hochbau auch nach Einführung der DIN 4115, bis zur Einstellung der BOL ab 1965, keine Rolle zuweisen, obwohl mit Fritz Leonardts Aufsatz *Leichtbau - eine Frage unserer Zeit*⁴⁷ bereits 1940 dem Rohr eine größere Berücksichtigung bei konstruktiven Entscheidungen zugesprochen wurde. Dieser Ansatz der effizienten Konstruktion entsprach eigentlich Neuferts Engagement für Feldflugzeughallen und Rüstungsbetriebe. Aber auch seine Publikationen in der Nachkriegszeit zu den Prinzipien des Industriebaus übernehmen diese Konstruktionsform nicht.

Schweigt Neufert sich in diesem Gesichtspunkt aus, wird aber an anderer Stelle beispielhaft eine kritische Einordnung vorgenommen, die der Petersens entspricht:

„Daß das kreiszylindrische Rohr der statisch günstigste Druckquerschnitt sein soll, kann in dieser allgemeinen Behauptung nicht ohne weiteres ausgesprochen

Zu 45 u. 46:

In der BOL 1943, BOL 1965 und BEL 1936: Hohlprofile/Rohre werden nicht diskutiert

Dagegen wird in der NS Bauzeitschrift *Der Deutsche Baumeister* 1940 ein Artikel zur praktizierten Stahleinsparung bei Hochspannungsmasten publiziert. Danach begannen erste Feldversuche bereits in den 1930er Jahren mit Freileitungsmaste bis 100 kV, die aus Rohrkonstruktionen in Serie produziert wurden. Zur Anwendung kamen in diesem Fall geschweißte Rohre.

Siehe: Echterhoff: Rohre für Freileitungsmaste, 1940, S. 37-38

Im ersten Heft derselben Reihe von 1940, erläutert Hermann Russow, Direktor des Deutschen Stahlbau-Verbandes, die Notwendigkeit der kriegsbedingten Stahleinsparungen und die daraus entwickelten erfolgreichen Strategien des Formleichtbaus; u.a. wird ein Flugzeughangar mit 85 m spannendem Rohrbogen beispielhaft erwähnt.

Siehe: Russow: Stahlsparen, 1940, S. 19

⁴⁵ Neufert: *Bauentwurfslehre*, 1936

⁴⁶ Neufert: *Bauordnungslehre*, 1943

⁴⁷ Siehe: Leonhardt: *Leichtbau*, 1940

*werden. Zur Erzielung eines großen Trägheitsmomentes ist zwar beim Rohr der Werkstoff günstig an der äußeren Umrandung des Querschnittes angeordnet wobei sich beim Kreisrohr in Bezug auf jede beliebige Achse gleich große Trägheitsmomente ergeben. Aber hier liegt bereits die Einschränkung, daß für bevorzugte Achsen mit dem Kreisquerschnitt nicht die größtmöglichen Trägheitsmomente zu erzielen sind.*⁴⁸

Grundsätzlich lassen sich in der Folgezeit die fachlichen Diskussionen um das Rohr im konstruktiven Kontext in die zwei Bereiche einteilen. Einerseits wird das Rohr mit abnehmender Wandstärke bei großen Radien Gegenstand von theoretischen und empirischen Betrachtungen hinsichtlich des lokalen Stabilitätsverhaltens durch Beulen und der Bewertung der Traglast in den neuen plastischen Bemessungsansätzen, andererseits ist das Gebiet der kraftschlüssigen form- und materialgerechten Fügung innerhalb der Schweißtechnologie nicht abgeschlossen. Es zeichneten sich alternative Verbindungstechniken ab, die eine Baustellenmontage befördern, oder erst die räumlich komplexen Knotenpunkte ermöglichen, die im Raumfachwerk schwer schweißbar bleiben.

8.7.3 Lösbare Verbindungen für ebene und räumliche Fachwerke

Ein Entwicklungsansatz bestand darin, die überzeugenden Eigenschaften von Rohren für Fachwerke zu erschließen und ein Verbindungssystem zu entwickeln, das die großen Stabkräfte montagefreundlich und formgerecht aufnehmen kann. Neue Ansätze der Verbindungstechnologie mussten auch grundlegende Vorbehalte überwinden, da im Bauwesen eine hohe Redundanz bei Verbindungsmitteln gefordert war. Der Sinnspruch, *eine Schraube ist keine Schraube*, hatte einen fast dogmatischen Stellenwert.

Das ebene und das räumliche⁴⁹ Fachwerk waren gegen Ende des 19. Jahrhunderts mit den Schriften Föppls (1854-1924) im wissenschaftlichen Diskurs zutreffend adressiert worden. Befanden sich die Stäbe im ebenen Fachwerk der Theorie nach in einem statisch bestimmten System und konnten mit Hilfe des Ritterschnitts oder graphisch mit dem Cremona-Plan bestimmt werden, so handelte es sich beim räumlichen Fachwerk um ein hochgradig statisch unbestimmtes System, dessen topologische Ordnungsregel sich nach Föppl aber einfach beschreiben lässt.⁵⁰

⁴⁸ o.A.: Stahlleichtbau, 1950, S. 38

⁴⁹ Föppl: Fachwerk im Raume, 1892

⁵⁰ Föppl: Fachwerk im Raume, 1892, S. 6

Trotz der mehrfachen statischen Unbestimmtheit der räumlichen Fachwerke können für den einzelnen Stab Normalkraftbeanspruchungen⁵¹ angesetzt werden, wenn man gelenkige Knotenpunkte voraussetzt.

Das Tetraeder ist danach die kleinste stabile Zelle eines räumlichen Fachwerks und wurde bereits 1903 von Alexander Graham Bell (1847-1922) in seinem Artikel *The Tetrahedral Principle in Kite Structure*⁵² als eine Bauweise aus geraden Stäben und Knoten theoretisch erfasst und praktisch zum Bau einer steifen Leichtbauweise für Flugdrachen genutzt (Abb. VIII. 17).

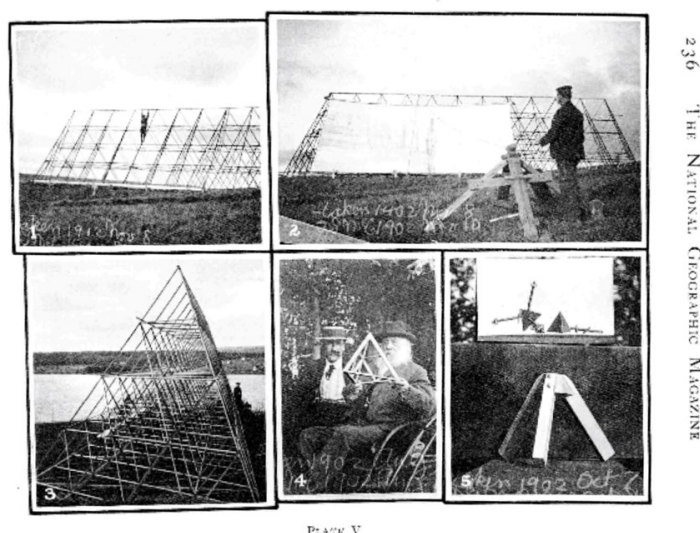


Abb. VIII. 17: Bells Flugdrachen mit Tetraeder-Raumfachwerk, 1903

Die Optimierung des Konstruktionsgewichtes war strukturell mit der Tetraederzelle weit entwickelt, aber die ersten Prototypen aus Holzstäben mit patentierten Knotenpunkten⁵³ aus Blech sollten von Metallrohren abgelöst werden, die nun auch für ortsgebundene Hochbauten, wie z.B. Aussichtstürme von Bell, genutzt wurden.

Konrad Wachsmann (1901-1980) gibt in seinem Buch *Wendepunkt im Bauen*⁵⁴ einen entwicklungsgeschichtlichen Rückblick, der Bells Rolle würdigt:

„Er [Bell] erkannte die außerordentliche Festigkeit solcher Konstruktionen und benutzte sie auch für Bauzwecke. Er stellte vorfabrizierte, standardisierte, massenproduzierte Tetraeder aus Metallstäben her und kam so zu Konstruktionen,

Anm.:

Aus Sicht des Verfassers dieser Arbeit spiegelt dieses Zitat Wachsmanns Unbehagen gegenüber der Selbstdarstellung Max Mengerlinghausens wider, der sein System MERO als genuin betrachtet. Buckminster Fuller, Wachsmann haben Gemeinsamkeiten, beide arbeiten für das Militär US Army/Air force und beziehen Vorarbeiten, bei Nennung der Quelle von z.B. Bell mit ein, wohingegen Neufert u. Mengerlinghausen auf Seiten des Dritten Reiches arbeiteten und im Fall Mengerlinghausen keine fremden Vorarbeiten erwähnt werden.

⁵¹ Siehe: Dutta: Hohlprofil-Konstruktionen, 1999, S. 348

⁵² Bell: Tetrahedral Principle, 1903

⁵³ US Patent #856,838, 1907

⁵⁴ Wachsmann: Wendepunkt im Bauen, 1959

*die alle späteren Beiträge auf diesem Gebiet der aufgelösten Systeme schon vorwegnahmen.*⁵⁵

Für Wachsmann sind die Begriffe Vorfabrikation, Standardisierung und Massenproduktion ab den 1920er Jahren die logisch notwendige Übertragung von Prinzipien aus der Automobilindustrie auf das Bauen. Das Raumfachwerk sieht er besonders geeignet, diese Kriterien zu erfüllen, da diese effiziente Struktur aus Metallrohren als effizientes Subsystemelement, realisieren lässt. Seine Entwicklungs- und Forschungsaktivitäten werden schon während des Zweiten Weltkrieges privatwirtschaftlich, und ab 1951⁵⁶ von der amerikanischen Armee gefördert, da sie die militärischen Anforderungen hinsichtlich Elementierung, geringem Transportgewicht, schneller und einfacher Montage und Demontage bei ungeschultem Personal entsprachen. Vorrangig war es die Luftwaffe mit ihrem Bedarf an immer größeren Fluzeughangern, die insgesamt die Maßstäbe der Optimierung jetzt vorgab, wie es zuvor noch die Kriegsmarine getan hatte. Buckminster Fuller (1895-1983) hatte mit seinen geodätischen Kuppeln parallel ein räumliches System entwickelt, das sich aufgrund seiner sphärischen Form besonders für die Behausung von rotierenden Radarantennen eignete, und neue Maßstäbe in Gewicht und Transportfähigkeit setzte. Buckminster Fuller war es gelungen, ein kohärentes System von Design-Strategien⁵⁷ zu entwickeln, dessen Quintessenz sich mit der Frage *was wiegt es* zusammenfassen lässt und das allgemeine Bewusstsein für Leichtkonstruktionen mit seriellen Elementen prägte.

Wachsmanns Fokus lag in diesem Kontext auf der Entwicklung von lösbaren Knotenverbindungen. Die *Mobilar Structure* (Abb. VIII. 18) von 1945 war ein erstes ebenes System mit angeschweißten Augenplatten, das größere Unterschiede in der Belastung der Einzelstäbe durch progressive Zunahme der Wandstärke des Rohres ausglich. Die gestanzten Augenplatten waren als asymmetrische Paare unterschiedlicher Materialstärke an die offenen Rohrenden punktverschweißt, und entsprachen damit einem günstigen Massenproduktionsprozess in den 1940er Jahren.

Zu ⁵⁶:

Wie Mengerhausen, betrieb Buckminster Fuller topologische Studien zu dichtesten Kugelpackungen und leitete aus dem Tetraeder sein Oktet-Gitter ab.

Die geodätischen Kuppeln waren der Form nach bekannt und zuvor beim Planetarium der Zeiss-Werke in den 1920er Jahren erstmals gebaut wurden. Buckminster Fuller entwickelte sie aber entscheidend weiter. Sie ließen sich sowohl als Stabwerke, als auch Flächentragwerke realisieren und das Rohr als Konstruktionselement hatte seinen festen Platz in Buckminster Fullers Entwürfen. Vgl.: Krause: Design-Strategie, 1973, S. 144ff

⁵⁵ Wachsmann: Wendepunkt im Bauen, 1959, S. 31

⁵⁶ Siehe: Wachsmann: Wendepunkt im Bauen, 1959, S. 160 u. 170

⁵⁷ Siehe: Krause: Design-Strategie, 1973

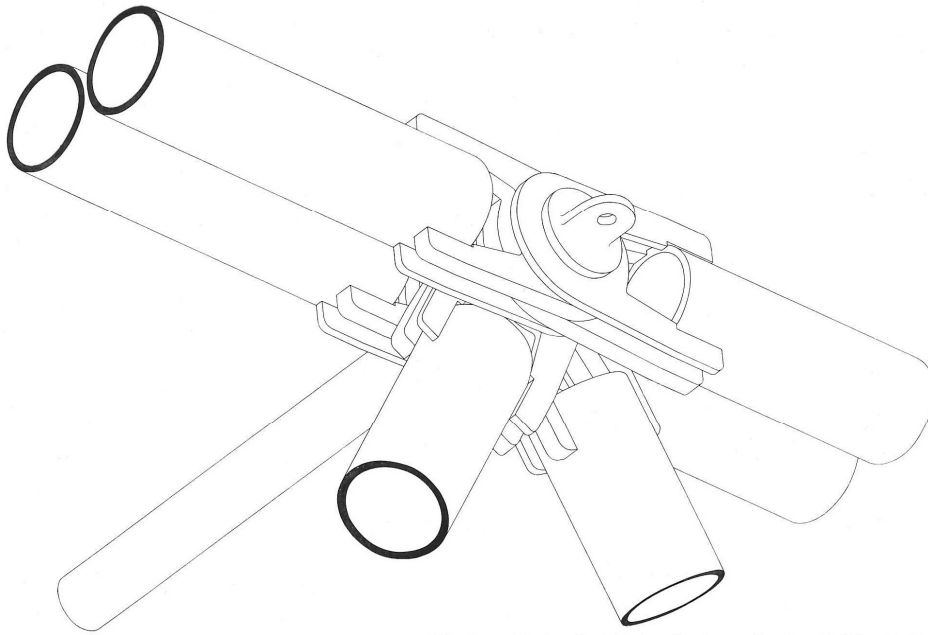


Abb. VIII. 18: Mobilar Structure von Wachsmann, 1945

Ein räumliches Knotensystem folgte in den 1950er Jahren, das zwar auf dem Tetraedersystem gründete, aber anstatt identischer Stäbe eine Haupttragrichtung mit Ober- und Untergurten vorsah. Der Knoten (Abb. VIII. 19) selbst war als gegliedertes Stecksystem mit Keilverchluss ringförmig um das kontinuierliche Hauptrohr angeordnet und konnte bis zu 20 Stäbe momentenfrei anschließen.

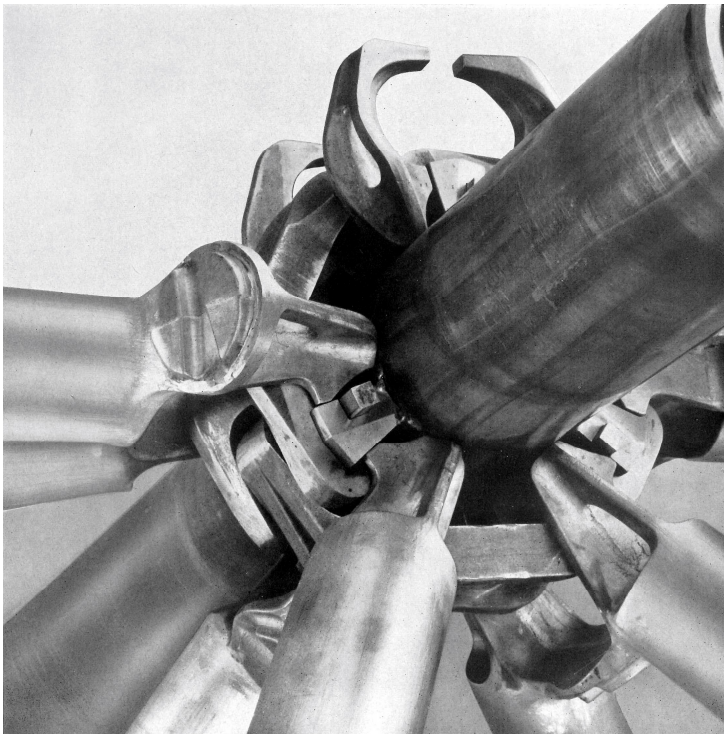


Abb. VIII. 19: Standardknoten Wachsmann, 1950er

Die Beschlagteile waren hier Gesenkschmiedestücke, die luftdicht auf die Rohrenden verschweißt wurden. Ausgelegt war das System zur Realisierung von Hangarbauten mit bis zu 50 m auskragenden Dächern.

Parallel zu dieser Entwicklung, war Max Mengerlinghausen (1903-1988) von Ernst Neufert (1900-1986) mit der Entwicklung eines Modulsystems für *Gerippekonstruktionen*⁵⁸ beauftragt worden, die auch hier den Anforderungen der Kriegswirtschaft genügen sollten⁵⁹. 1940 wird von Mengerlinghausen sein *Baugesetz der regelmäßigen Raumbachwerke*⁶⁰ vorgelegt, das er als Föppl-Schüler für geometrische Körper gleicher Stablängen, wie das Tetraeder und Körper mit veränderlichen Stablängen, aus der *geometrischen Reihe des natürlichen Wachstums* mit dem Faktor $\sqrt{2}$ ableitete. Sein wesentlicher Beitrag bestand aber darin, einen Universalknoten aus dem flächenzentrierten Kubus zu konstruieren. Der 26-Flächen wird von 18 Quadraten und 8 Dreiecken gebildet, sodass alle Quadratflächen den gleichen Abstand zur Kugelmittle aufweisen; es ergeben sich 18 Anschlüsse in Form von Innengewinden mit festem Winkel: der MERO-Normknoten (Abb. VIII. 20).

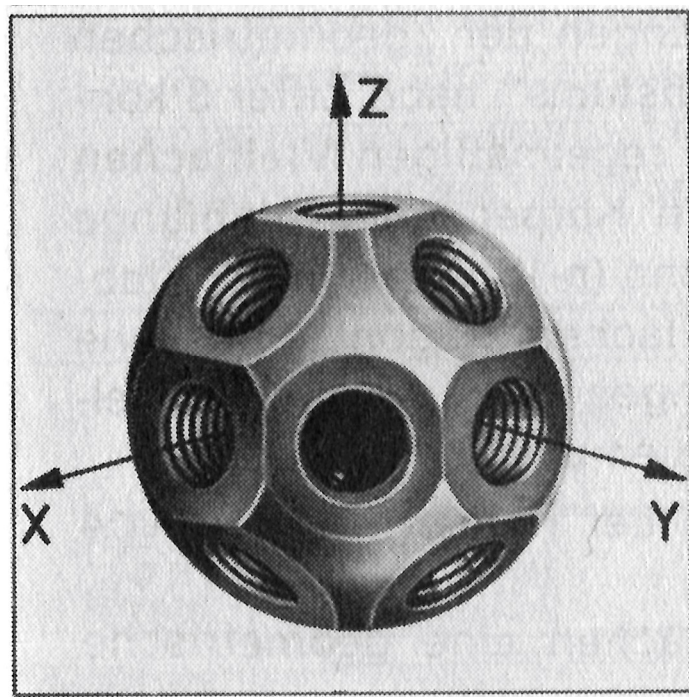


Abb. VIII. 20: MERO-Norm-Knoten mit Innengewinde für 18 Stabanschlüsse, 1940er Jahre

Das Stahlrohr (Abb. VIII. 21) ist auch bei Mengerlinghausen die Gestaltform und der Werkstoff der ersten Wahl, wenn er über den Stab im Raumbachwerk resümiert:

⁵⁸ Siehe: Mengerlinghausen: *Komposition im Raum*, 1983, S. 112

⁵⁹ Siehe: Mengerlinghausen: *Komposition im Raum*, 1983, S. 112

⁶⁰ Mengerlinghausen: *Komposition im Raum*, 1983, S. 114f

„Als wesentliches Ergebnis der Untersuchungen des Verfassers [Mengerlinghausen] hat sich ergeben, daß Stahlrohre mit dünner Wandung im Verhältnis zur Wanddicke großen Durchmessers äußerst günstige Ergebnisse in der Anwendung bei Raumfachwerken ergeben.“⁶¹

Er berief sich auf einen von der Natur inspirierten Leichtbauansatz, den er mit der *Leichtbau-Kennzahl* Z_L quantifizierte und zur Bewertung verschiedener Kombinationen von Außendurchmessern und Wandstärken bei Stahlrohren aus St.37 anwendete.

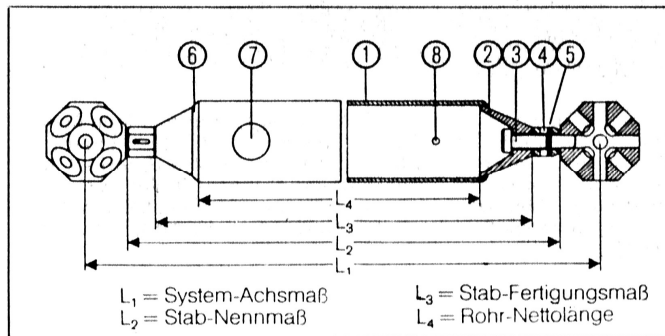


Bild 121
1 Kreishohlprofil
KHP (Rohr)
2 Kegel
3 Gewindebolzen
4 Schlüsselmuffe
5 Knebelkerbstift
6 Schweißnaht
7 Entwässerungs-
bohrung
8 Bolzen-
einführloch

Abb. VIII. 21: MERO-System Schnitt und Ansicht Stahlrohrstab mit Knoten

Das Stahlrohr geringer Wandstärke wird zu diesem Zweck mit zwei kegelförmigen Endstücken verschweißt, die über einen drehbaren Gewindebolzen verfügen und über ihre Zuspitzung den notwendigen Abstand zu den benachbarten Stabanschlüssen halten. Trotz der umlaufenden Schweißnaht ist das Rohr nicht luftdicht verschlossen, da planmäßig kleine Löcher zur Bolzendurchführung und größere zur Entwässerung vorgesehen sind. Mengerlinghausen hebt selbst 1983 noch hervor, dass diese konstruktiven Maßnahmen im Einklang mit den kriegsvorbereitenden und ab 1937 kriegswichtigen Einsparungsvorgaben im Stahlbau standen, die er verklausuliert 'volkswirtschaftliche Gründe' nennt.⁶²

Das System MERO⁶³ war auf dem deutschen Markt das erste serielle Raumfachwerksystem und hat bis heute noch Bestand. Ähnliche Systemansätze wurden von anderen Herstellern in der Nachfolge entwickelt, wobei hauptsächlich die Knotenausbildung aus patentrechtlichen Gründen abweichen.

Fröhlich stellte 1959 ein Einschrauben-System vor, das bereits seine Zulassung im Geltungsbereich der Bundesbahn für Antennenmaste erhalten hatte:

Anm. zu Z_L :

Die Leichtbaukennzahl wird im Kapitel 9 über die Optimierungsstrategien näher erläutert. Die Bewertung der Effizienz von konstruktiven Systemen und Werkstoffen wird ab den 1920er, aus den Anforderungen der Luftfahrt kommend, in allen konstruktiven Disziplinen populär und ist weltweit mit Namen wie Bell, Buckminster Fuller, Wachsmann, Otto, Mengerlinghausen, Le Ricolais und Leonhardt verbunden.

Anm.:

Alternative Systeme waren z.B.:

- Nodus
- Okta-S
- Unistrut

Nicht alle Systeme verwendeten Rohre für die Stäbe, wie Unistrut z.B. auf gekantete offene Profilen basierte.

⁶¹ Mengerlinghausen: *Komposition im Raum*, 1983, S. 41

⁶² Siehe: Mengerlinghausen: *Komposition im Raum*, 1983, S. 41

⁶³ Deutsches Bundespatent #874 657, 1953

„Gleichzeitig war die allgemeingültige Forderung bei Rohrkonstruktionen einzuhalten, daß die Fachwerkstäbe an ihren Enden dicht abgeschlossen sein müssen. Die oben erwähnten kompakten Verbindungsteile führen zwangsläufig zu einem Anschluß der Stäbe untereinander mit einer einzelnen Schraube. Diese einzelne Schraube hat bei der Montage jedoch den großen Nachteil, daß bei geringen Bauabweichungen oder Vorspannungen ein Zusammenbau außerordentlich schwierig ist. Es waren daher gleichzeitig bei dieser Entwicklungsaufgabe auch Mittel und Wege zu suchen, eine einfache und schnelle Montage zu gewährleisten.“⁶⁴

Entwickelt wurde eine geschraubte Bauart, deren Montage dadurch erleichtert wurde, dass in einem ersten Schritt mit Hilfe eines Montagedorns eine Scherhülse (Abb. VIII. 22) aus kaltgezogenem Präzisionsrohr gesetzt wurde.

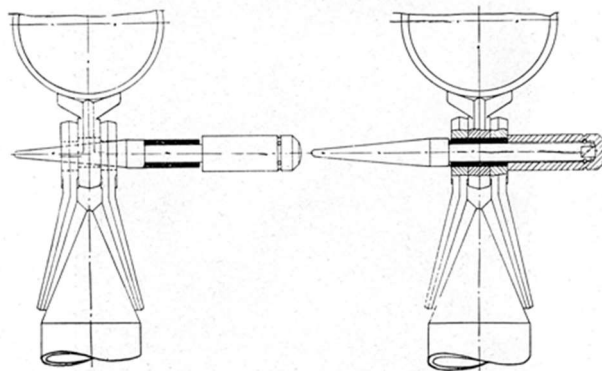


Abb. VIII. 22: Setzen einer passgenauen Scherhülse mit Hilfe des Montagedorns

In einem zweiten Schritt wurde die Scherhülse durch eine einfache Schraube in der Lage gesichert. Die Scherhülse war so ausgelegt, dass sie bereits zu 100% die Scherkraft aufnehmen konnte, die dem Innendurchmesser abgestimmte Schraube konnte ihrerseits zusätzlich 50% der planmäßigen Scherkräfte aufnehmen; in diesem Sinne handelt es sich eigentlich um eine Steckverbindung mit geschraubter Lagesicherung. Sechs normierte Rohrabmessungen bildeten die Grundlage dieses Konstruktionssystems (Abb. VIII. 23), für die anschweißbare Beschläge aus Stahlgesenkschmiedestücken der Güte St52 zur Anwendung kamen. Die Gabelköpfe konnten auf den konischen Endstücken in verschiedenen Weiten aufgeschweißt werden, wodurch zweischnittige Verbindungen variierender Größe ermöglicht wurden.

⁶⁴ Fröhlich: Sonderkonstruktionen mit Rohren, 1959, S. 20

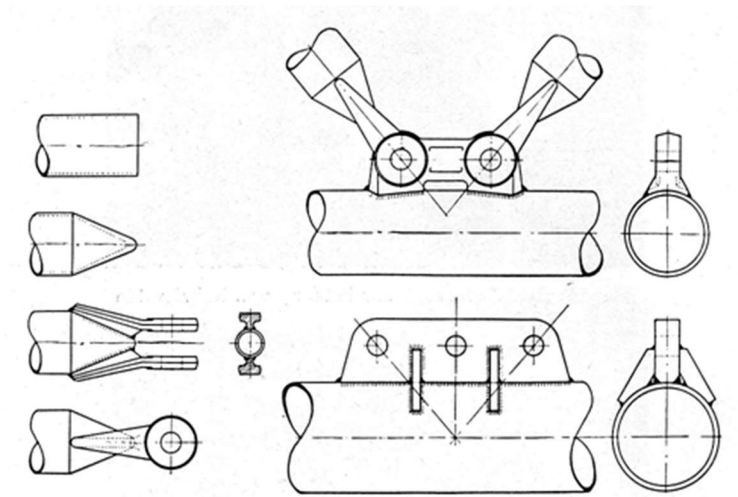


Abb. VIII. 23: Konstruktionsmerkmale der Stahlgesenkschmiedeformstücke für Einschrauben-System, 1950er Jahre

Das Konzept setzte auf standardisierte Beschläge für übliche Rohrdurchmesser, wobei durchlaufende Gurtrohre bevorzugt wurden und nur die Diagonalen aus den Netzlängen des Systems abgeleitet wurden.

Tabellenverzeichnis Kapitel 8:

- Tabelle VIII. 1: Volumen und Gewicht eines Druckprismas von 1 cm Höhe bei $F=100\text{kN}$. Aus: Verfasser
- Tabelle VIII. 2: E-Modul und Formbarkeit im Sinne des Kreisringes verschiedener historischer Werkstoffevor 1885. Aus: Verfasser
- Tabelle VIII. 3: Historische Sicherheitsbeiwerte für Druckstäbe aus Gusseisen nach Bargmann. Aus: Bargmann, Horst: Historische Bautabellen : Normen und Konstruktionshinweise 1870-1960. 5. Aufl., Werner Verl., Köln, 2013, S. 312ff
- Tabelle VIII. 4: Historische Sicherheitsbeiwerte für Druckstäbe aus Schmiedeeisen, Schweisseisen und Flusseisen nach Bargmann. Aus: Bargmann, Horst: Historische Bautabellen : Normen und Konstruktionshinweise 1870-1960. 5. Aufl., Werner Verl., Köln, 2013, S. 312ff

Abbildungsverzeichnis Kapitel 8:

- Abb. VIII. 1: Vergleich von Kragträgern gleicher Masse und Länge bei Galilei mit $F_E \gg F_F$, 1638. Aus: Galilei, Galileo: Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze, attenenti alla mecanica & i movimenti locali, Elsevier. Leiden, 1638, Ausgabe ETH-Bibliothek Zürich Shelf Mark: Rar 5498 Persistent Link: <http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-3923>, S. 147
- Abb. VIII. 2: Interaktionsdiagramme zur Schnellbemessung von Gussstützen nach Barré, 1870. Aus: Barré, L. A.: Résistance des Colonnes en Fonte. In: Revue générale de l'architecture et des travaux publics : journal des architectes, des ingenieurs, des archéologues, des entrepreneurs, des industriels du bâtiment, etc., Bd. 28, Paris, 1870/71, Tafel Vol XXVIII_P1 52-53
- Abb. VIII. 3: Bereinigter Ausschnitt aus Abb. 2, Interaktionsdiagramm massiver Gussstützen nach Barré, 1870. Aus: Barré, L. A.: Résistance des Colonnes en Fonte. In: Revue générale de l'architecture et des travaux publics : journal des architectes, des ingenieurs, des archéologues, des entrepreneurs, des industriels du bâtiment, etc., Bd. 28, Paris, 1870/71, Tafel Vol XXVIII_P1 52-53
- Abb. VIII. 4: Ausschnitt aus Abb. 2, Interaktionsdiagramm hohler Gussstützen nach Barré, 1870. Aus: Barré, L. A.: Résistance des Colonnes en Fonte. In: Revue générale de l'architecture et des travaux publics : journal des architectes, des ingenieurs, des archéologues, des entrepreneurs, des industriels du bâtiment, etc., Bd. 28, Paris, 1870/71, Tafel Vol XXVIII_P1 52-53
- Abb. VIII. 5: Vergleich verschiedener Stützenkonstruktionen bei gleich Nutzlast, N° 5 Gusseisenrohr, Dipl.-Ing. Schniete TH Braunschweig 1932. Aus: Planblatt Prof. Dr.-Ing. Robert Schniete, Technische Hochschule Braunschweig, Januar 1932, im Bestand der Sammlung für Architektur und Ingenieurbau der TU Braunschweig (SAIB) G71 II/1.1
- Abb. VIII. 6: Ausschnitt aus o. g. Planblatt, Gegenüberstellung des Platzbedarfes von verschiedenen Stützen bei 80 t Tragkraft, Gusseisenrohr grau markiert, Dipl.-Ing. Schniete TH Braunschweig 1932. Aus: Archivale Schniete: Stützenkonstruktionen. Planblatt Prof. Dr.-Ing. Robert Schniete, Technische Hochschule Braunschweig, Januar 1932, im Bestand der Sammlung für Architektur und Ingenieurbau der TU Braunschweig (SAIB) G71 II/1.1
- Abb. VIII. 7: Ausschnitt aus o. g. Planblatt, Gegenüberstellung des Gewichtes von verschiedenen Stützen bei 80 t Tragkraft, Gusseisenrohr grau markiert, Dipl.-Ing. Schniete TH Braunschweig 1932. Aus: Archivale Schniete: Stützenkonstruktionen. Planblatt Prof. Dr.-Ing. Robert Schniete, Technische Hochschule Braunschweig, Januar 1932, im Bestand der Sammlung für Architektur und Ingenieurbau der TU Braunschweig (SAIB) G71 II/1.1

- Abb. VIII. 8: Vergleich von Walzprofilen nach Höhe des Flächenträgheitsmomentes bei ähnlichem Metergewicht bei Dipak Dutta. Aus: Dutta, Dipak: Hohlprofil-Konstruktionen. Ernst & Sohn, Berlin 1999, S. 3
- Abb. VIII. 9: Einfluss der Querschnittsform auf das Flächenträgheitsmoment eines Stabes ($F=\text{const.}$), nach Büttner & Hampe. Aus: Büttner, Oskar und Hampe, Erhard: Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur : Band 2. Ernst u. Sohn, Stuttgart 1985, S. 34
- Abb. VIII. 10: Beispiel für Handreichung für neue Anwendungsgebiete von Stahlrohren, Merkblatt für Spielplatzgeräte aus Stahlrohr, 1954. Aus: Hrg. Beratungsstelle für Stahlverwendung: Spielplatzgeräte aus Stahlrohr. In: Merkblätter über sachgemäße Stahlverwendung, Lfd. Nr. 109, Düsseldorf, 1954, Titelseite
- Abb. VIII. 11: Produktinformation der Mannesmannröhren-Werke AG, 1955. Aus: o.A.: Mannesmann Stahlrohrbau : 3087. Hrg. Mannesmannröhren-Werke Aktiengesellschaft, 4. Auflage, Düsseldorf, 1955, Titelseite
- Abb. VIII. 11a: Geschmiedete Schmuckformen aus Mannesmann-Rohr, 1891. Aus: Schlenning, W.: Das Mannesmann-Rohr in seiner Bedeutung für das Kunstgewerbe. In: Deutsche Bauzeitung, XXV. Jg., N° 69, S. 417-421 u. N° 70, S. 425-427, Berlin, 1891, Ausschnitt der Bildbeilage S. 430
- Abb. VIII. 12: Imperator Pavel I mit Groß- und Vormars auf hyperboloiden Gittermasten aus Rohren, 1912. Aus: https://en.wikipedia.org/wiki/Russian_battle-ship_Imperator_Pavel_I; 27.02.2018, 19:00
- Abb. VIII. 13: Gitterturm aus Rohren für Windmotor „Herkules“ der Fa. Windturbinen-Werke Dresden, 1899. Aus: o.A.: Industrie-Warte. S. 866, Nr. 54, vermut. 1899
- Abb. VIII. 14: Rohrthürme [sic] der Fa. Mannesmann aus nahtlosem Stahlrohr unrealisiert, vermut. 1892. Aus: Mannesmann-Archiv, Faksimile aus Sammlung Burkhardt
- Abb. VIII. 15: Gegenüberstellung von jeweils 9 Kennwerten verschiedener Walzprofile als Pendelstab von 5 m Länge, 1975. Aus: Köhler, Albert: Rund-Hohlprofile für den Stahlbau. In: Merkblatt 224, Hrsg. Beratungsstelle für Stahlverwendung, 4. Auflage, Düsseldorf, 1975 S. 53
- Abb. VIII. 16: Zulässige Druckkräfte einiger Stabquerschnitte bei ungefähr gleichem Metergewicht, 1959. Aus: Jamm, W.: Das Stahlrohr als Konstruktionselement. In: Konstruieren in Stahlrohr, S. 3-8, Tagungsband, Hrg. Deutscher Stahlverband, Beratungsstelle für Stahlanwendung und VDI-Fachgruppe Konstruktion, Vulkan-Verlag, Essen, 1959, S. 4
- Abb. VIII. 17: Bells Flugdrachen mit Tetraeder-Raumfachwerk, 1903. Aus: Bell, Graham Alexander: The Tetrahedral Principle in Kite Structure. In: National Geographic, Vol. XIV, N° 6, Juni, S. 218-251, 1903, S. 236, 1903<https://www.loc.gov/resource/magbell.37700202/?sp=35>
- Abb. VIII. 18: Mobilar Structure von Wachsmann, 1945. Aus: Wachsmann, Konrad: Wendepunkt im Bauen. Krausskopf-Verlag, Wiesbaden, 1959, S. 161
- Abb. VIII. 19: Standardknoten Wachsmann, 1950er Jahre. Aus: Wachsmann, Konrad: Wendepunkt im Bauen. Krausskopf-Verlag, Wiesbaden, 1959, S. 171
- Abb. VIII. 20: MERO-Norm-Knoten mit Innengewinde für 18 Stabanschlüsse, 1940er Jahre. Aus: Mengerlinghausen, Max: Komposition im Raum : Die Kunst individueller Baugestaltung mit Serienelementen. Bertelsmann Fachzeitschriften, Gütersloh, 1983, S.113
- Abb. VIII. 21: MERO-System Schnitt und Ansicht Stahlrohrstab mit Knoten. Aus: Mengerlinghausen, Max: Komposition im Raum : Die Kunst individueller Baugestaltung mit Serienelementen. Bertelsmann Fachzeitschriften, Gütersloh, 1983, S.115
- Abb. VIII. 22: Setzen einer passgenauen Scherhülse mit Hilfe des Montagedorns. Aus: Fröhlich, J.: Sonderkonstruktionen mit Rohren. In: Konstruieren in Stahlrohr, Tagungsband, Hrg. Deutscher Stahlverband, Beratungsstelle für Stahlanwendung und VDI-Fachgruppe Konstruktion, Vulkan-Verlag, Essen, 1959, S. 20

Abb. VIII. 23: Konstruktionsmerkmale der Stahlgesenkschmiedeformstücke für Einschrauben-System, 1950er Jahre. Aus: Fröhlich, J.: Sonderkonstruktionen mit Rohren. In: Konstruieren in Stahlrohr. Tagungsband, Hrg. Deutscher Stahlverband, Beratungsstelle für Stahlanwendung und VDI-Fachgruppe Konstruktion, Vulkan-Verlag, Essen, 1959, S. 20

9.0 Optimierungsstrategien für hohle Stäbe aus Eisenwerkstoffen als Pendelstab

Die Frage nach einer Optimierung ist analog zur Diskussion um die Eignung von hohlen Stäben zu behandeln. Konnte die Eignung der hohlen Stäbe aus Eisenwerkstoffen für die Zielsetzung der effizienten Druckkraftübertragung zwischen zwei Punkten bautechnikgeschichtlich nachvollzogen werden, sollen im Folgenden Optimierungsstrategien zusammengestellt werden, die eine Steigerung der Effektivität bezweckten.

Die Eignung der hohlen Stäbe aus Eisenwerkstoffen bestand, wie gezeigt werden konnte, in der günstigen Gestaltform und ihren herausragenden Festigkeiten gegenüber den traditionellen Werkstoffen. Das Gieß- und später das Walzverfahren erwiesen sich unter den frühen industriellen Produktionsbedingungen der Serienfertigung für kreisrunde Hohlkörper mit konstanten Innenradien als effizient.

9.1 Strukturelle und geometrische Imperfektionen

Eine frühe Optimierungsstrategie bestand bei den Gussstützen zunächst darin, die strukturellen und geometrischen Imperfektionen gegenüber dem Ideal eines homogenen und maßhaltigen Hohlstabes zu reduzieren (Abb. IX. 1).

Anm.:

In Ergänzung zur Stütze ist die Bezeichnung Säule eine architektonische, stilistische Einordnung. Im Tragverhalten wird u.U. bei einer Säule aufgrund ihrer Fügung und/oder ihres Materials eine Druck- und Zugbeanspruchung ausgeschlossen. Diese Differenzierung ist im sprachlichen Gebrauch bei historischen u. zeitgenössischen Texten nicht immer konsequent anzutreffen.

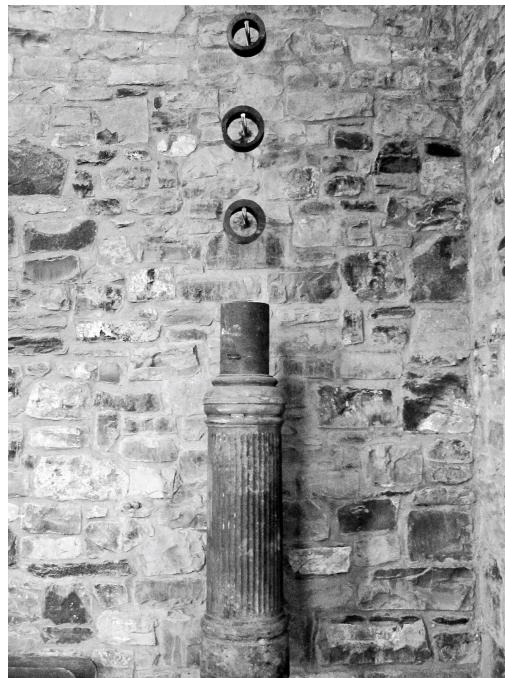


Abb. IX. 1: Historische Gussstütze mit deutlichem Kernversatz, Botanischer Garten Dublin, ca. 1840

Mit strukturellen Imperfektionen werden Gießfehler bezeichnet, die zu einer bauteilinternen Schwächung führen. Die Literatur nennt hier Risse, Kaltschweißstellen, Schlacken- oder Formstoffreste ursächlich.¹

Der sogenannte Kernversatz ist dagegen die häufigste Ursache für geometrische Imperfektionen bei Gussstützen mit hohlem Kern. Besonders die älteren Gießverfahren, im liegenden oder schrägen Gusskasten, konnten die erforderliche konzentrische Fixierung des Gießkernes nicht immer auf seiner gesamten Länge gewährleisten, da dieser den Auftriebskräften im dichteren Gusseisen ausgesetzt war. Im Ergebnis war die Wandstärke zur Mitte der Stützenlänge in einer Richtung deutlich reduziert (Abb. IX. 2).

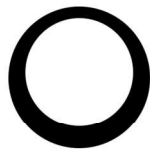


Abb. IX. 2: Deutlicher Kernversatz durch Auftriebskräfte bei der Gussstütze aus Abb. IX. 1

Die heterogene Qualität des Werkstoffes und die geometrischen Imperfektionen waren den Konstrukteuren bewusst, sodass eine Einzelabnahme der Stützen durch Probelastungen die größte Sicherheit bot. Dennoch kam es immer wieder zu spektakulären Einstürzen von Bauwerken. Das Versagen der Eisenbahnbrücke 1879 über den Firth of Tay ist wohl das bekannteste Unglück, bei dem eine mehrschüssige Pfeilerkonstruktion aus verstrebtten Gussstützen im Sturm bei der Überfahrt eines Zuges versagten (Abb. IX. 3).

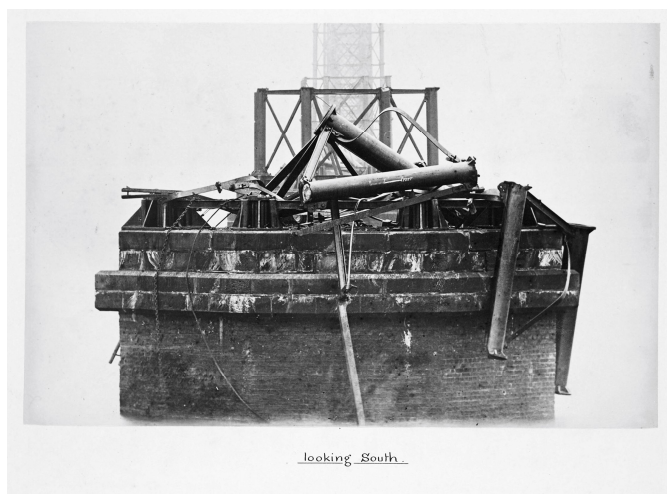


Abb. IX. 3: Zerstörter Brückenpfeiler aus Gussstützen der Eisenbahnbrücke über den Firth of Tay, 1879

¹ Siehe: Käßlein/Wielgosch-Frey: Historische Eisen- und Stahlkonstruktionen, 2001, S. 22

Anm. zu ²:

Das Unglück wurde literarisch vom Techniker Max Eyth (1836-1906) aufgearbeitet: Eyth: *Die Brücke über die Ennobucht*, 1899 erstmals erschienen. Eyth: *Ennobucht*, 1957

Theodor Fontane (1819-1898) ließ sich zu seinem Gedicht *Die Brück' am Tay* von 1880 inspirieren. Fontane: *Die Brück' am Tay*, 1905

Der Abschlussbericht der Untersuchungskommission bemängelt neben Planungs- und Wartungsfehlern auch die Qualität der verwendeten Gussstützenelemente.²

In dieser Richtung der Optimierung lässt sich auch die Entwicklung der kreisförmigen Stahlhohlprofile bis in die Gegenwart einordnen, die die Geometrie der Hohlprofile durch definierte geometrische Toleranzen festlegt, die Formgebungsverfahren weiterentwickelte und zu verbesserten Werkstoffeigenschaften führte.

² Siehe: Rothery: Tay Bridge Disaster, 1880

9.2 Optimierung der Gestaltform

Einen anderen Ansatz der Optimierung für reine Druckpendelstäbe bestand in der Optimierung der Gestaltform selbst. Der konstante ringförmige Querschnitt über die Länge eines Druckstabes ist bezogen auf den Eulerfall II nicht der effektivste, da, der Biegefigur folgend, nur auf halber Höhe ein maximaler Trägheitsradius angesetzt werden muss; mit zunehmender Annäherung an die Gelenkpunkte kann der Querschnitt sich somit stark verjüngen, und so an den Enden der einfachen Materialfestigkeit genügen.

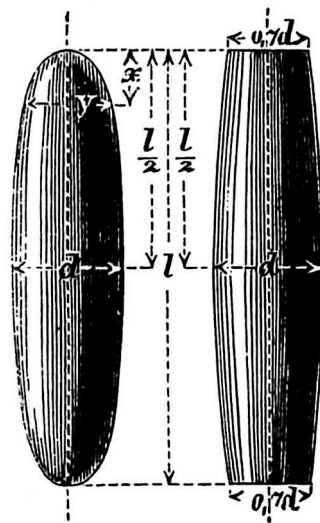


Abb. IX. 4: Körperform von gleicher rückwirkender Festigkeit für den ringförmigen Querschnitt, Redtenbacher 1876

Bereits 1876 wird von Klasen ein F. Redtenbacher zitiert, der folgende Formel zur Ermittlung einer *Körperform von gleicher rückwirkender Festigkeit für den ringförmigen Querschnitt* (Abb. IX. 4) angab:³

Gl. IX. 1

$$\frac{x}{\left(\frac{l}{2}\right)} = \frac{2}{\pi} \left(\arcsin \frac{y}{d} - \frac{y}{d} \sqrt{1 - \left(\frac{y}{d}\right)^2} \right)$$

Zu Gl. IX 1:
Die Variablen d , l , x u. y
sind der Abb. IX. 4. Zu
entnehmen.

³ Klasen: Hochbau-Constructions in Eisen, 1876, S. 136

Anm. zu 4:

Dieses Argumentationsmuster gegen logische Konstruktionsformen war bis zum 1. Weltkrieg nicht unüblich. Das baukonstruktive Element konnte noch nicht frei von stilistischen Vorstellungen rezipiert werden, die sich auf die sogenannte Schwerkraftästhetik bezogen. Die Kräfteverläufe aus der klassischen Tektonik bestimmten immer noch die Sehgewohnheiten. So wurde Laves' linsenförmiger Träger oder auch Möllers Gurtträger als unschön bezeichnet, da sich ihre Form nicht aus den Sehgewohnheiten erschließen ließ.

Zu Gl. IX. 2:

I_a : Flächen Trägheitsmoment an der Stelle a

P : Traglast

a : s. Abb. IX. 5

E : E-Modul

Eine gültige Näherung läge vor, wenn die *Enddurchmesser sich zum mittleren Durchmesser wie 7:10* verhielten und durch eine konvexe Linie verbunden werden. Diese Regel sei auch auf kreuzförmige Stützen anwendbar; insgesamt widerspräche diese logische Form aber nach Klassen den Sehgewohnheiten der *Schwerkraftästhetik*⁴, und eine Ausführung wird daher nur für den oberen Säulenschaft empfohlen.

Königer verzichtet bereits in seiner *Konstruktion in Eisen*⁵ von 1902 auf ästhetische Anmerkungen und erläutert eine Formel, mit deren Hilfe sich das notwendige Flächenträgheitsmoment an der maßgebenden Stelle $l/2$ und an einer beliebigen Stelle a ermitteln lässt (Abb. IX. 5)⁶:

Gl. IX. 2

$$I_a = \frac{P(2a)^2}{\pi^2 \cdot E}$$

Die praktische Form weicht der theoretischen gegenüber insoweit ab, als das Königer betont, dass die Querschnittsfläche immer der zulässigen Druckspannung entsprechen muss und nicht gegen Null divergieren kann.

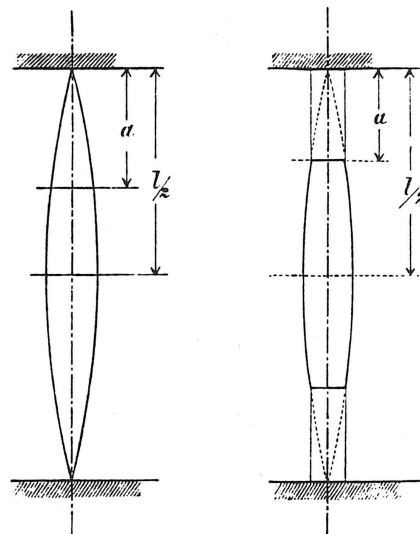


Abb. IX. 5: Theoretische Form der Säule gegen Ausknicken links und praktische Form rechts nach Königer, 1902

Trotz der genannten ästhetischen Einwände wurden konvexe Pendelstäbe⁷ schon in der Mitte des 19. Jahrhunderts ausgeführt, wenn auch die wahre Formgebung durch Zierformen auch noch bei der Berliner

⁴ Siehe: Schädlich: Eisen in der Architektur, 2015, S. 260

⁵ Königer: Die Konstruktion in Eisen, 1902

⁶ Königer: Die Konstruktion in Eisen, 1902, S. 65f u. 34

⁷ Siehe: Schädlich: Eisen in der Architektur, 2015, S. 255

Stadtbahn gegen Ende des 19. Jahrhunderts kaschiert wurde (Abb. IX. 6).

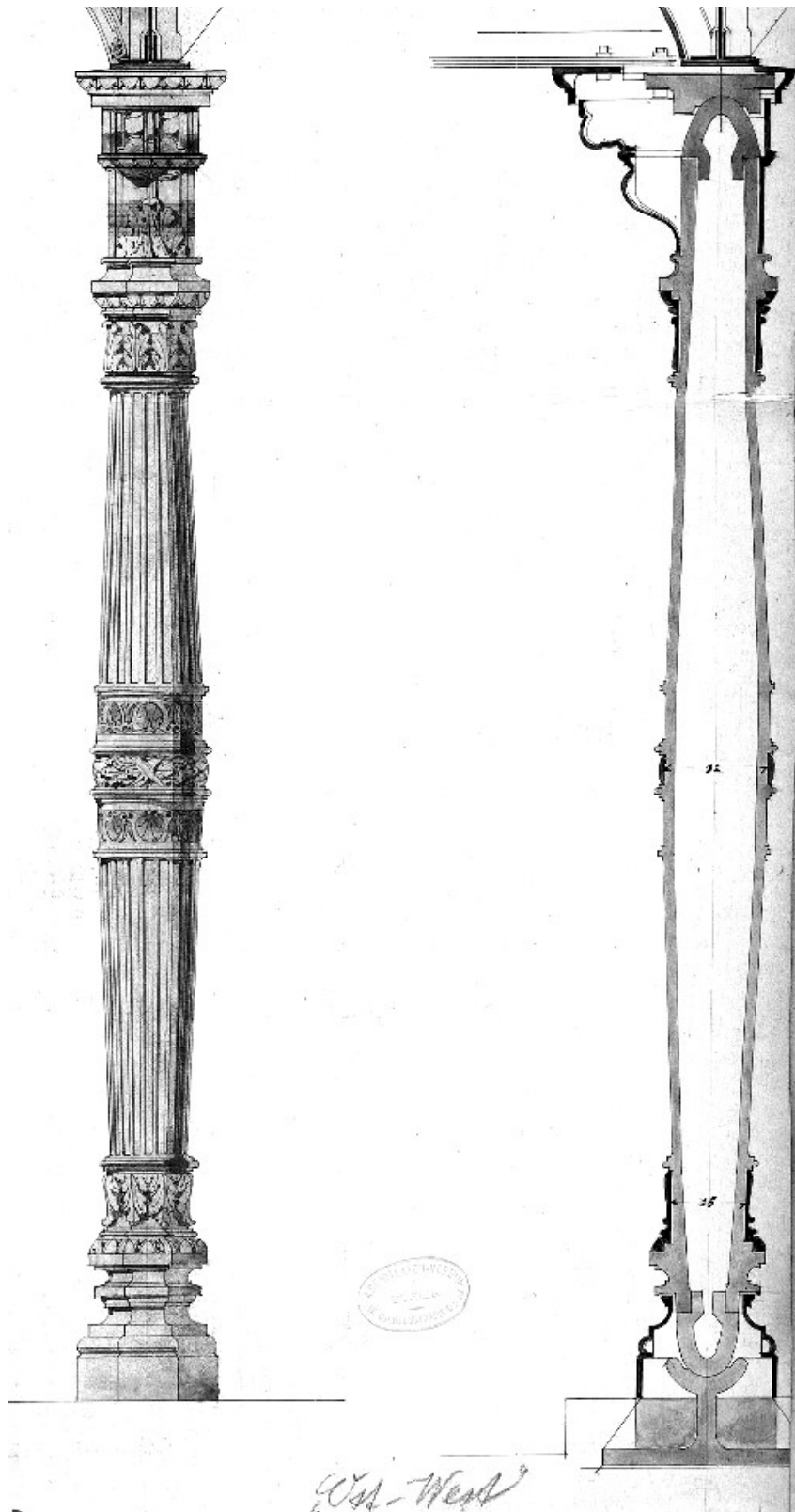


Abb. IX. 6: Architektonische Formgebung einer Pendelstütze der Berliner Stadtbahn. Monatskonkurrenz März 1880

9.3 Impulse aus dem Naturstudium

Von einer stilistischen Tradition weitgehend befreit, waren die anderen konstruktiven Disziplinen, die im schmiedeeisernen und folgend dem stählernen Rohr ein Konstruktionselement sich aneigneten, das auf Grund seiner duktilen und schweißbaren Werkstoffeigenschaften neue Aspekte einer Optimierung ermöglichte. Die Fahrradindustrie verwendete Stahlrohre seit den 1870er Jahren⁸ und stellte die technologische Grundlage für steife Leichtbauten der beginnenden Luftfahrt.

Waren die Analogien zu den Leichtbauten der Natur, wie der hohle Vogelknochen, bekannt, wurden natürliche Konstruktionen nun systematischer studiert, um Strukturen zu identifizieren, die ein metallisches Rohr hinsichtlich des Materialeinsatzes noch biege- und torsi- onssteifer gestalten zu können.

Begünstigt wurde dieses Naturstudium durch die sprunghafte Entwicklung der Mikroskopie und der Photographie zur Jahrhundertwende um 1900. Es war jetzt möglich, auch Strukturen auf der Mikro-Ebene zu studieren und großformatig zu publizieren. Der Photograph Karl Blossfeldt (1865-1932) publizierte 1928 sein Mappenwerk *Urformen der Kunst*⁹ über Makroaufnahmen von Pflanzenteilen (Abb. IX. 7) und ihren Schnittbildern (Abb. IX. 8). Dieses künstlerisch intendierte Buch fand große Verbreitung, und war auf Grund seiner sachlich, nüchternen Darstellung auch für wissenschaftliche Erkenntnisse geeignet.

Anm.:

Bei Neufert wird der Schachtelhalm noch in der Tradition einer Naturstudie zur Ableitung einer ästhetischen Proportionsregel herangezogen. In der *Bauordnungslehre* von 1943 wird der Goldene Schnitt am Blatt des Hahnenfuß⁶ und des Schachtelhalms erkannt.

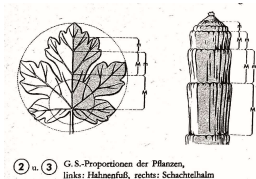


Abb. IX. 7a: Proportionsstudie in der BOL, 1943

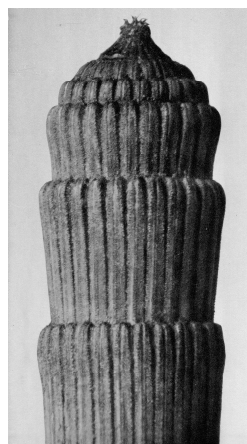


Abb. IX. 7: Spross des Winter-Schachtelhalms (*Equisetum hiemale*), Blossfeldt 1929

Das Schnittbild des Stängels des Schachtelhalms (Abb. IX. 8) zeigt deutlich die Struktur eines mehrschaligen Aufbaus. Eine innere, glatte Zylinderschale ist über radiale Stege an eine profilierte äußere Mantelfläche angeschlossen. Es kann vermutet werden, dass dieser strukturelle

⁸ Siehe: Ashby: Materials, Bicycles, and Design, 1995, S. 1103

⁹ Als Buch erstmals erschienen: Blossfeldt: Urformen der Kunst, 1929

Aufbau eines hochwachsenden Halmes die zeitgenössischen Ingenieure dazu inspirierte, mit dünnwandigen, mehrschaligen Konstruktionen zu experimentieren, um den lokalen Beulwiderstand von hohlen Stäben zu erhöhen.

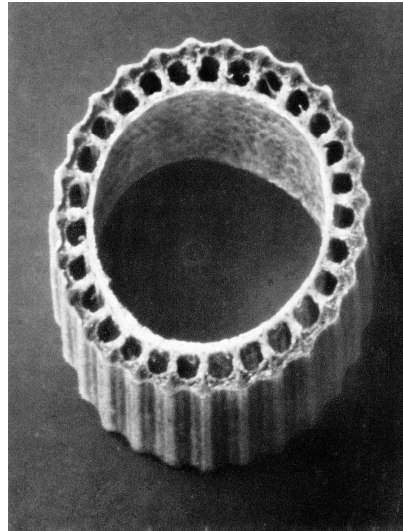


Abb. IX. 8: Halmquerschnitt des Winter-Schachtelhalms (*Equisetum hiemale*), Blossfeldt 1929

9.3.1 Rohrleichtbauformen bei Leonhardt

Tatsächlich ist es Fritz Leonhardt (1909-1999), der mit seinem Aufsatz *Leichtbau – eine Forderung unserer Zeit*¹⁰ 1940 Leichtbaustahlrohre mit struktureller Ähnlichkeit zum Schachtelhalm skizziert (Abb. IX. 9), dabei aber selbst das Schnittbild eines einfachen Strohhalmes als Analogie begleitend abbildet (Abb. IX. 10).

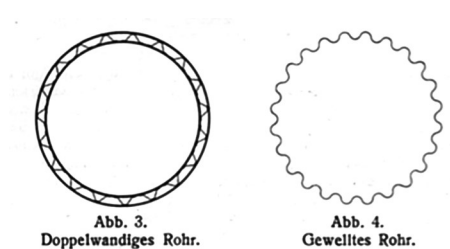


Abb. IX. 9: Querschnitte von Leichtbaustahlrohren, Fritz Leonhardt 1940

Leonhardts Artikel steht ganz unter den Sparzwängen der Kriegswirtschaft und attestiert dem Stahlhochbau erhebliches Einsparpotential durch Adaption bekannter Leichtbauformen aus der Fahrzeug- und Luftfahrtindustrie. Er verweist in seinem Artikel auf Wanslebens *Leichtbautechnik*¹¹, die den Stand der Entwicklung von dünnwandigen Konstruktionselementen aus Metallwerkstoffen am Ende der 1930er Jahre

¹⁰ Siehe: Leonhardt: Leichtbau, 1940

¹¹ Siehe: Wansleben: Leichtbautechnik, 1937

wiedergibt. Die erzielbaren Gewichtseinsparungen bei Flugzeugen rechtfertigen auch strukturierte und mehrschalige Rohrquerschnitte, wie sie Abb. IX. 9 zeigt, das Bauwesen könne aber nach Leonhardts Meinung bereits von glatten, dünnwandigen Rohren mit Wandstärken zwischen 1 mm bis 3 mm profitieren, die in dieser Form noch nicht seiner Zeit in Deutschland im Bauwesen verfügbar waren.



Abb. 1.
Querschnitt durch einen Strohalm.

Abb. IX. 10: Analogievorbild Querschnitt durch einen Strohalm, Fritz Leonhardt 1940

Er stellt in der Abb. IX. 11 verschiedene handelsübliche Profilquerschnitte von Druckstäben, denen von generischen Rundrohren mit geringer Wandstärke im Verhältnis zum Quermesser gegenüber, und weist so Stahleinsparungen von bis zu 58% nach.

Querschnitt aus Formstahl	Gewicht kg/m	mass. t	Länge bei $\lambda=100$ cm	Trag- fähig- keit t	Rohrquerschnitte gleichen Tragfähigkeit bei etwa gleichen Außenabmessungen				Stahl- er- sparnis in %	Bemerkungen
					auß. Dmr. mm	Wandst. mm	L. cm	Gewicht kg/m		
100/100/12	17,8	—	2,0	13,5	100	4,0	3,92	5,43	47	Werkst. bei allen Querschn. St. 37 $\sigma_R = 1400 \text{ kg/cm}^2$
IP 20	26,3	—	1,86	13,5	200	2,3	6,92	11,0	58	
P 40	164	—	7,50	129,0	400	8,6	13,8	83	49	
IP 20	25,3	—	2,74	13,1	200	2,3	6,92	11,0	56	
100/100/12	35,6	3,8	3,80	26,9	250	2,7	8,76	15,05	58	
L 20	50,6	8,1	6,74	37,4	200	7,7	6,92	32,8	35	
I 20	52,6	9,0	8,0	38,7	250	6,8	8,92	41	33	durch größere Durchmesser sind größere Ersparnisse möglich
100/100/12	71,2	28	17,4	53,8	500	5,8	17,7	71	28	
100/100/12	38,4	16	7,55	48,7	400	3,0			50	$\lambda=50$ des Einzelstabes möglich

Abb. IX. 11: Stahlersparnis bei Druckstäben aus Rohren, Leonhardt 1940

Leonhardt sieht dieser theoretischen Leistungsfähigkeit von Druckstäben aber baupraktische Aspekte entgegenreten, wenn er feststellt:

„Ob die statisch günstigen Rohrquerschnitte für Fachwerkdrukstäbe im Brückenbau sinnvoll angewandt werden können, muß wegen der schwierigen Anschlüsse bezweifelt werden.“¹²

Er sieht daher Entwicklungsbedarf für kraftschlüssige Verbindungstechniken für die dauerhaften Konstruktionen im Hochbau, wie es sie schon für demontierbare Verbindungen, zum Beispiel im Gerüstbau, gab.

9.3.2 Rohrleichtbauformen bei Mengerlinghausen

Max Mengerlinghausen (1903-1988) beginnt nach eigener Darstellung mit der systematischen Untersuchung und Bewertung von *sparsamen Konstruktionen* in den späten 1930er Jahren unter dem Einfluss des Vierjahresplanes zur Einsparung von Stahl aus volkswirtschaftlichen Gründen¹³, auf den sich Fritz Leonhardt in seinem Artikel auch indirekt bezog. Mengerlinghausen greift auf erste Ansätze Boschs mit der Profilzahl p zurück, die die *Auswahl unter mehreren, die Festigkeit ausreichend berücksichtigende Lösungen*¹⁴ ermöglicht:

Gl. IX. 3

$$p = \frac{I}{e^2 \cdot F}$$

Zu Gl. IX. 3:

I : Flächenträgheitsmoment
 e : Abstand der Schwerachse zur äußersten Faser
 F : Querschnittsfläche
 p : Profilzahl

Konnten so *die Wege zu einer Ersparnis* erfasst werden, sah Mengerlinghausen aber Bedarf für eine formelmäßige Erfassung des *Grades der Sparsamkeit*.¹⁵ Gesucht war seiner Meinung nach:

„[...] auf den verschiedenen Gebieten der Technik in gleicher Form anwendbarer Wertmesser für die sparsame Stoffverwendung oder Stoffausnutzung ähnlich dem Begriff des Wirkungsgrades für die Energienutzung.“¹⁶

Mit der *Leichtbaukennzahl* Z_L führt Mengerlinghausen einen einfachen Quotienten aus Gesamtlast P_G und der Eigenlast P_E einer Tragkonstruktion ein:

Gl. IX. 4

$$Z_L = \frac{P_G}{P_E}$$

Zu Gl. IX. 4:

P_G : Gesamtlast wird hier als aufnehmbare Last (in kg) verstanden

Aus dieser Leichtbaukennzahl kann wiederum auf andere relevante Werte geschlossen werden: Die spezifische Nutzlast und der spezifische Konstruktionsaufwand.¹⁷

¹² Leonhardt: Leichtbau, 1940, S. 420

¹³ Siehe: Mengerlinghausen: Komposition im Raum, 1983, S. 41

¹⁴ Mengerlinghausen: Komposition im Raum, 1983, S. 38

¹⁵ Mengerlinghausen: Komposition im Raum, 1983, S. 38

¹⁶ Mengerlinghausen: Komposition im Raum, 1983, S. 38

¹⁷ Mengerlinghausen: Prinzip des Leichtbaues, 1960, S. 523

Die Berechnung der Leichtbaukennzahl wird für die Beanspruchungen Zug, Biegung und Druck nach seinen Formeln möglich; die Druckbelastung wird in die Fälle ohne (Gl. IX. 5) und mit Knickung (Gl. IX. 6) unterteilt.¹⁸

Zu Gl. IX. 5 u. 6:
 Z_{LD} : ohne Knickung
 Z_{LK} : mit Knickung
 l : Baulänge in cm
 γ : Wichte des Werkstoffs in kg/cm³
 ω : Knickzahl (DIN 4114/4113)
 $\sigma_{D zul}$: Werkstofffestigkeit in kg/cm² (DIN 1050)

Gl. IX. 5

$$Z_{LD} = \frac{\sigma_{D zul}}{\gamma l}$$

Gl. IX. 6

$$Z_{LK} = \frac{\sigma_{D zul}}{\omega \gamma l}$$

Mengeringhausen nutzte Gl. IX. 6, um für verschiedene Verhältnisse von Außendurchmessern zu variierenden Wandstärken von Stahlrohren ein Optimum der Leichtbaukennzahl für knickgefährdete Hohlstäbe von 200 cm Länge zu ermitteln (Abb. IX. 12).

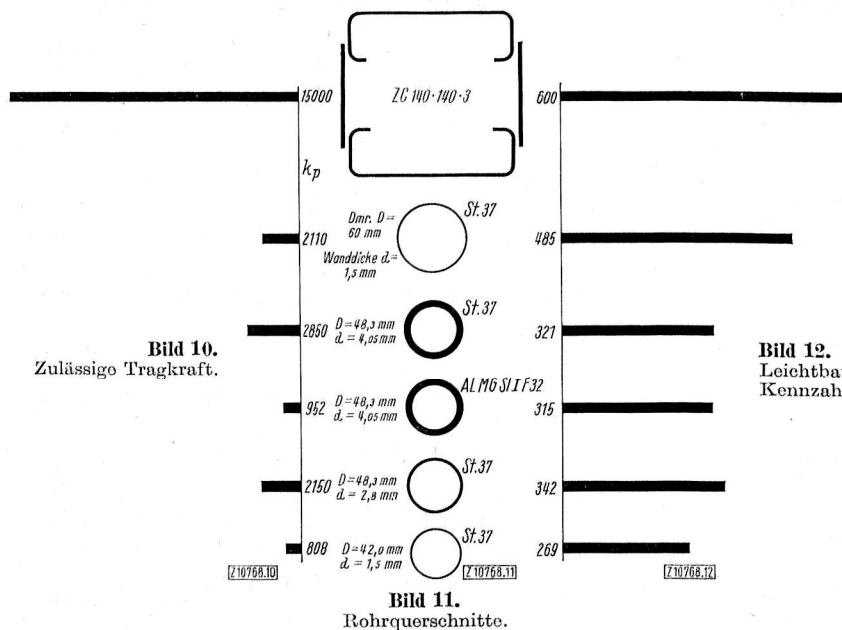


Bild 10 bis 12. Anwendungsbeispiel für die Leichtbau-Kennzahl bei Stützen aus Rohren im Gerüstbau.

Vergleich der Tragfähigkeit und der Leichtbau-Kennzahl von Rohren für verschiedene Querschnitte und verschiedene Baustoffe (Stahl und Leichtmetall) bei einer Knicklänge 2 m (unabhängig von dem Verbindungsmitteln).

Abb. IX. 12: Leichtbaukennzahlen schlanker Hohlstäbe, Mengeringhausen

Analog zur Reißlänge von zugfesten Materialien erkennt er eine zulässige Knicklänge $l_{K zul}$ für Druckstäbe, bei der der lotrecht stehende Stab durch sein Eigengewicht gerade in der zulässigen Weise belastet wird.¹⁹

¹⁸ Mengeringhausen: Komposition im Raum, 1983, S. 42f

¹⁹ Mengeringhausen: Komposition im Raum, 1983, S. 43

Die Abb. IX. 12 zeigt deutlich, dass der Stabquerschnitt *e* aus St.37 eine günstige Bauform darstellt, der aber aufgrund seiner geringen Wandstärke von 1,5 mm erst mit der DIN 4115²⁰ von 1950 im konstruktiven Hochbau regulär zur Anwendung kommen konnte. Sein Patent für *Verbindungen von Rohrstäben und knotenbildenden Verbindungsstücken, insbesondere für zerlegbare Fachwerkkonstruktionen*²¹, wird bereits 1943 patentiert und kommt für Gerüste und Antennenmaste zum Einsatz. Der Markenname *MERO* verweist auf den Namen Mengerlinghausen und seine Rohrbauweise, die 1953 auf Grundlage des Reichspatentes auf ein bundesdeutsches Patent übertragen wurde.

9.3.3 Rohrleichtbauformen bei Le Ricolais

Unerwähnt bleibt bei Mengerlinghausen und Leonhardt ein vielbeachteter und prämierter Artikel²² von Georges-Robert Le Ricolais (1894-1977) über die Verwendung von Wellblech zur Ausformung steifer Platten und Röhren aus dem Jahr 1935.

Auch Le Ricolais beginnt seine Ausführungen anhand von Beobachtungen an natürlichen Konstruktionen, die diese *nombreux exemples d'économie maximum*²³ anbieten. Sein Studienobjekt ist die obere Schalenhälfte einer Jakobsmuschel mit ihrer ausgeprägten Profilierung, die bei genauerer Betrachtung eine zweite, feinere Profilierung aufweist:

*„Un dédoublement de celles-ci, réalisé le plus souvent au maximum de convexité d'une onde primaire, nous permet de concevoir que grâce à cette double disposition d'ondes, la rigidité et la résistance à l'écrasement sont maintenues constantes tout le long du profil“*²⁴

Dieses Prinzip übertrug er auf industrielles Wellblech, das in einer Richtung eine größere Steifigkeit als das entsprechende Flachblech aufweist, aber quer zu den Wellen genauso biegeweich bleibt. Durch kreuzförmige Überlagerung und elektrische Punktschweißung wurde aus einer stark anisotropen Gestaltform ein in zwei Richtungen isotroper Körper, den er *ISO FLEX* nannte.

Bemerkenswert ist, dass er dieses Prinzip auf Röhren übertrug (Abb. IX. 13), sodass dünnwandiges Blech für große Rohrdurchmesser zur Anwendung kommen konnte. Eine Wellblechlage wurde mit Längsausrichtung zur Rohrachse, und eine zweite mit Wellenrichtung quer zur Rohrachse angeordnet und kraftschlüssig punktverschweißt.

Anm.:

Le Ricolais publizierte 1940 seinen *Essai sur des Systèmes Réticulés à 3 Dimensions*, in dem er die dreidimensionalen Tragstrukturen von Radiolarien beschreibt, um daraus Strukturformen für räumliche Fachwerke ab zu leiten. Le Ricolais: *Systèmes Réticulés*, 1940

Übersetzung zu ²⁴:

"Eine Aufspaltung als Teilung derselben, die in der Regel mit der maximalen Konvexität einer Primärwelle durchgeführt wird, erlaubt es uns, festzustellen, dass dank dieser Doppelwellenanordnung die Steifigkeit und der Quetschwiderstand über das gesamte Profil konstant gehalten werden"

²⁰ DIN 4115: Stahlleichtbau, 1950, S. 1, Tafel 1.

²¹ Deutsches Bundespatent #874 657, 1953

²² Siehe: Le Ricolais: *Tôles Composées*, 1935

²³ Le Ricolais: *Tôles Composées*, 1935, S. 412

²⁴ Le Ricolais: *Tôles Composées*, 1935, S. 410



Abb. IX. 13: Eléments Tubulaires ISOFLEX, Le Ricolais 1930er Jahre

Zu Gl. IX. 7:

I_p : Polares Flächenträgheitsmoment
 R : Profil Mittellinie
 e : Materialstärke
 k : das Verhältnis der abgewinkelten Welle zu ihrer Periode

Zu Gl. IX. 8:

I : Flächenträgheitsmoment
 S_v : Querschnittsfläche

Sein System *Tubulaires ISOFLEX*²⁵ hatte gegenüber der Skizze Leonhardts für ein einfach gewelltes Rohr (Abb. IX. 9 rechts) deutliche Vorteile: Es liegt eine hohe Torsionssteifigkeit, ein hoher Widerstand gegen seitliche Lasten und ein günstigeres Verhalten bei zentrischer Druckbelastung vor, da Verschiebungen der stehenden Welle durch die Welle in Balgenform behindert wird. Das polare Trägheitsmoment ist danach:

$$\text{Gl. IX. 7} \quad I_p = 4\pi R^3 e k$$

Gl. IX. 8

$$\frac{I}{S_v} = \frac{2\pi R^3 e k}{4\pi R^2 e k} = 0,5R$$

Er errechnete auf dieser Grundlage für einen eingespannten Mast²⁶ aus *Tubulaire ISOFLEX* von 12 m Höhe eine Gewichtsparsnis gegenüber einer konventionellen Gittermast-Konstruktion aus Walzprofilen von ca. 43%.

Es folgten Strukturstudien über Radiolarien, die er 1940²⁷ publizierte, auf deren Grundlage er Bildungsgesetze für räumliche Tragwerke entwickelte. Die frühen Erkenntnisse über das vorteilhafte Tragverhalten der *Tubulaires ISOFLEX* wurden in den 1960er Jahren zu

²⁵ Siehe: Le Ricolais: *Tôles Composées*, 1935, S. 425

²⁶ Siehe: Le Ricolais: *Tôles Composées*, 1935, S. 429

²⁷ Le Ricolais: *Systèmes Réticules*, 1940

einer aufgelösten Tragstruktur in Röhrenform kombiniert (Abb. IX. 14), den sogenannten *automorphen Röhren*.

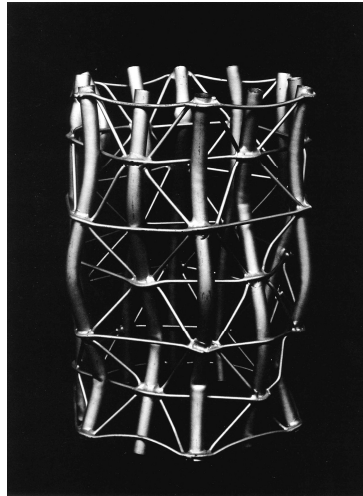


Abb. IX. 14: Automorphe Röhre nach Belastungsprobe, Le Ricolais 1960er Jahre

Danach habe jede Oberflächenstruktur ein *skelettartiges Äquivalent*²⁸, das eine Übertragung der sich gegenseitig stabilisierenden Wellblechlagen in ein verwobenes Fachwerk ermöglicht, sodass die äquatorialen Stäbe die vertikalen am Ausknicken hindern. Diese Strukturform kann ihrerseits in Subelemente aus Tubulaires ISOFLEX aufgelöst werden, sodass eine Skalierung in Megastrukturen denkbar ist.

Ein anderer Aspekt seines Naturstudiums ist nach McCleary:

„[...] die Unterteilung in zwei strukturellen Zonen: eine äußere, unter Spannung stehende Membran und ein auf Druck belasteter innerer Kern, [...] [Le Ricolais] schlägt zwei Konstruktionsstrategien vor: die Trennung von Balance zwischen Tragwerk (auf Druck belastbaren Kern) und Last (zugbelastbare Oberfläche)[...]“²⁹

Für diese Balance wählt er den Begriff der *bimorphen*³⁰ Form, die experimentell an seilverspannten Rohrstäben für Biegung und Normalkraftbelastung untersucht (Abb. IX. 15).

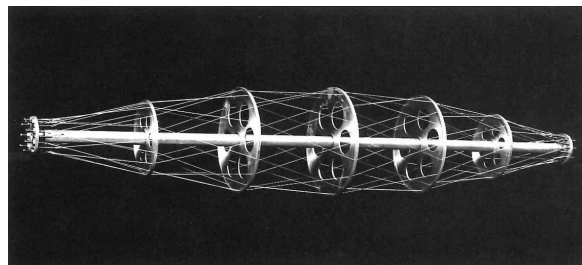


Abb. IX. 15: Bimorphes *Lemniscate*, Seilnetzverspannter Hohlstab, Le Ricolais 1960er Jahre

²⁸ Siehe: McCleary: Unzerstörbare Idee, 2002, S. 66

²⁹ McCleary: Unzerstörbare Idee, 2002, S. 65

³⁰ Siehe: o.A.: Things Themselves Lying, 1973

9.3.4 Seilverspannte Druckstäbe

Ist das Seilnetz in Abb. IX. 15 eine aufgelöste Form einer Membran, wie bei den Radiolarien beobachtet, so ist die Seilverspannung in einer oder zwei Ebenen zur Stabachse eine alte Bauform, deren Anfänge im Unklaren liegen. Die empirische Erfahrung mit schlanken Stäben unter Biegebeanspruchung hatte dazu geführt, dass wahlweise eine Unterspannung oder Abspannung durch Schrägseile zu Stabilisierung entgegen der Erdanziehung beitragen konnten – Windbelastungen mussten in der horizontalen Ebene durch beidseitige Verspannungen mit Spreizen kompensiert werden, da deren Richtung zufallsbasiert ist. Als frühes Beispiel für einen zweiseitigen Kragträger zur Aufnahme von optischen Linsen kann hier die *Machinae Coelestis* (Abb. IX. 16) von Johannes Hevelius (1611-1687) aus Danzig von 1670 genannt werden.

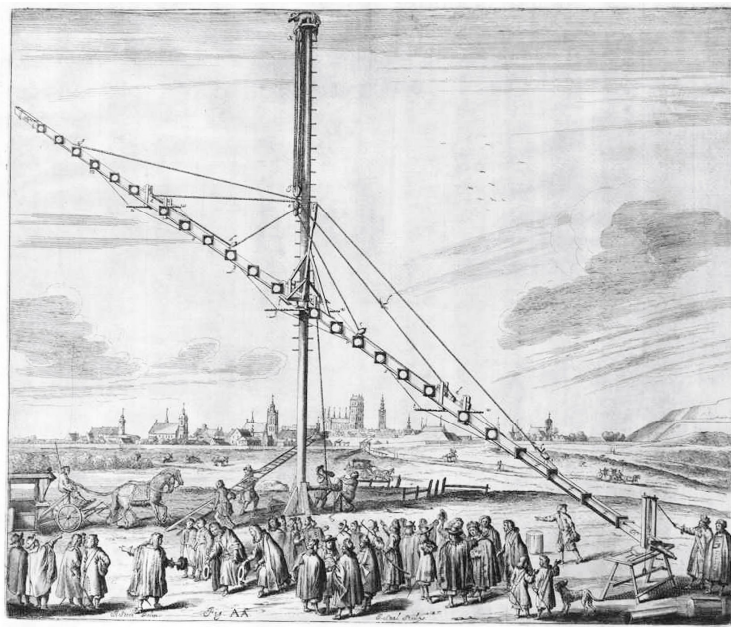


Abb. IX. 16: Seilverspanntes 45 m Teleskop Johannes Hevelius, 17. Jhd.

Die einfache und mehrfache elastische Stützung eines senkrecht stehenden Stabes durch vorgespannte oder schlaffe Zugglieder ist ebenfalls ein historisches Prinzip zur Reduzierung der Knicklänge, aus der Segelschiffahrt kommend, das auch heute noch für Sendemaste zur Anwendung kommt. Die ruhenden Lasten sind hier das Eigengewicht, die Abspannung selbst und ggf. die Antennenaufbauten, ein planmäßiger Ansatz zusätzlicher, lotrechter Lasten ist nicht vorgesehen.

Anders verhält es sich bei seilverspannten Druckstäben, die nach Schock³¹ wie folgend definiert werden:

³¹ Schock: Seilverspannte Druckstäbe, 1976

„Seilverspannte Druckstäbe sind Tragwerke, bei denen ein durchgehender Druckstab durch ein geschlossenes System von Zuggliedern und Spreizen verstärkt wird.

Grundprinzip der hier beschriebenen Bauweise ist es, Kräfte in Komponenten von Zug und Druck aufzuspalten. Die für ein Tragwerk ungünstige Biegebeanspruchung wird so abgemindert zu Gunsten einer für das Tragwerk günstigeren Normalkraftbeanspruchung.“³²

Bautechnikgeschichtlich stehen Squire Whipples (1804-1888) Brückenbauten aus der Mitte des 19. Jahrhunderts, für eine durchdachte Anwendung von schlanken Druckgliedern mit Seilverspannung (Abb. IX. 17).

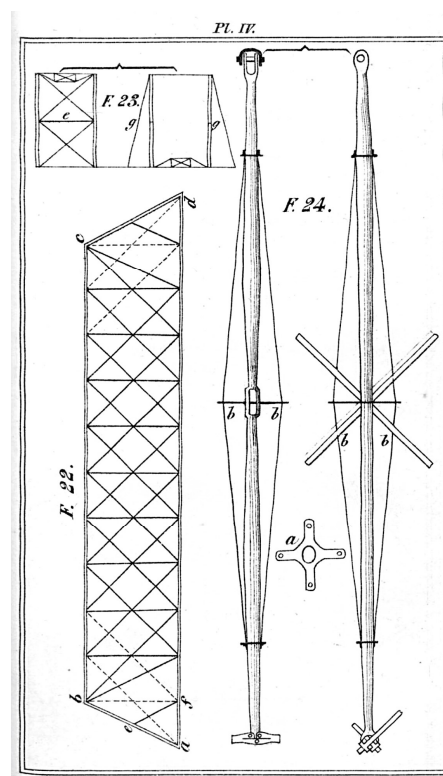


Abb. IX. 17: Seilverspannte Druckstäbe für eiserne Brückenbauten, Whipple 1847

In seiner 1847 publizierte Aufsatzsammlung³³ über Theorie und Praxis zum Brückenbau aus Eisen oder Holz diskutiert er die Unterschiede von Schmiedeeisen und Gusseisen und deren sinnvolle Anwendung im Brückenbau. So sah er das günstigere Gusseisen trotz seiner geringeren Festigkeiten³⁴ für Druckglieder geeignet, und war sich des Einflusses der Gestaltform bei schlanken Druckgliedern bewusst; unabhängig davon lassen sich aber lange, zusammengesetzte Druckglieder gegen seitliches Ausweichen durch Verspannungen mit Spreizen sichern:

³² Schock: Seilverspannte Druckstäbe, 1976, S. 17

³³ Siehe: Whipple: Analyses and Comparisons, 1847 & Whipple: Practical Details, 1847

³⁴ Siehe: Whipple: Analyses and Comparisons, 1847, S. 61

„Another modification which the double cancelled truss requires is, an opening in the middle of the vertical, for the diagonals to pass through. For this purpose, and to give them stiffness their great length renders necessary, without too great an expenditure of materials, they may be formed, when of considerable length, as shewn [sic] in Fig. 24, Pl. 4.

The middle or cast iron portion is in two, or may be in 4 pieces, and connected and stiffened by the 4 small bent wrought iron bolts b.b. & c., (two only appearing in each view,) passing through flanges formed for that purpose, and strained out in the middle by a plate as seen at a, interposed between the two cast iron parts forming the main body of the vertical. The castings may be tubular, or of a \times formed section; if very long, the tubular form will be preferable.“³⁵

Die von Schock erwähnte *günstigere Normalkraftbeanspruchung* kann spätestens seit den 1950er Jahren mit Näherungsannahmen quantitativ gefasst werden.³⁶

Als Vergleichsmaßstab wir hierzu die theoretische Eulerlast eines gelenkig gelagerten Stabes gleicher Länge ohne Verspannung herangezogen, sodass $N_k \ll N_{zul}$ ist. Es werden hierbei Faktoren von 2,97 bis 4,0³⁷ für N_k für seilverspannte Druckstäbe genannt.

Diese hohen Raten der Tragfähigkeitssteigerung sind beachtlich, da das System im Element des Druckstabes zunächst eine Druckvorspannung aus der Rückverankerung der Zuelemente erfährt, diese aber durch die erhöhte Stabilität der elastischen Stützung mehr als kompensiert wird.

Die strukturellen Elemente eines seilverspannten Druckstabes werden nach Schock wie in Abb. IX. 18 funktional differenziert. Eine Minimalform stellt aber die einfache Spreizung mit drei Zuelementen unter 120° dar, wobei die Spreizen meridional an ihren Enden mit Zuelementen untereinander auf Abstand gehalten werden.

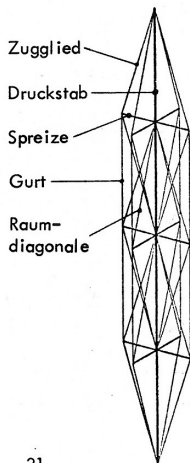
³⁵ Whipple: Practical Details, 1847, S. 77f

³⁶ Siehe: Schock: Seilverspannte Druckstäbe, 1976, S. 25ff

³⁷ Siehe: Schock: Seilverspannte Druckstäbe, 1976, S. 25ff

4. Gliederung der Tragwerke nach dem geometrischen Aufbau

Erläuterung der Begriffe



Die Tragwerke werden vorwiegend nach geometrischen Gesichtspunkten gegliedert, d.h. es wird ein Gliederungsprinzip verwendet, welches nur auf den sichtbaren Eigenschaften der Tragwerke aufbaut. Die statischen Gegebenheiten und das Tragverhalten müssen nicht bekannt sein.

Auf eine Unterscheidung von Zug- und Druckgliedern konnte nicht verzichtet werden, jedoch wurden Fragen der Biegebeanspruchung, der Lagerung und des Einspanngrads bewußt ausgespart.

Druckglied	vorwiegend druckbeanspruchtes Tragwerksteil (Überbegriff)
Druckstab	stabförmiges Tragwerksteil, vorwiegend druckbeansprucht
Druckelement	ebenes oder räumliches Tragwerksteil, vorwiegend druckbeansprucht
Zugglied	vorwiegend zugbeanspruchtes Tragwerksteil
Knoten	Punkt, an dem mehrere Tragwerksteile miteinander verbunden sind
Gurt	stabförmiges Zugglied an der Peripherie des Tragwerks
Flächendiagonale	schräg verlaufendes, stabförmiges (Zug-)Glied in außenliegenden Flächen des Tragwerks
Raumdiagonale	schräg verlaufendes, stabförmiges (Zug-)Glied in innenliegenden Flächen des Tragwerks
Spreize	Quer zur Hauptrichtung des Tragwerks vom Zentrum zur Peripherie verlaufendes, vorwiegend druckbeanspruchtes, lineares Tragwerksteil.
Spreizenelement	Hauptsächlich quer zur Hauptrichtung des Tragwerks vom Zentrum zur Peripherie verlaufendes, vorwiegend druckbeanspruchtes, ebenes oder räumliches Tragwerksteil

Anm. zu Abb. IX. 18:

Die Spreizen, hier in zwei orthogonalen Ebenen zueinander angeordnet, können konstruktiv durch meridionale Zugglieder oder durch räumliche Diagonalverspannungen in ihrer Ebene fixiert werden.

Hier ist die Terminologie Schocks in der Abb. IX. 18 bezüglich der Flächen- bzw. Raumdiagonalen inkonsistent.

Abb. IX. 18: Gliederung des seilverspannten Druckstabs nach Schock, 1976

Es sind auch Bauformen mit mehreren Spreizungen üblich, die die Länge der Spreizen zu den Enden des Druckstabes verringern, sodass die Gurte sich einer Fischbauform, in einer Ebene betrachtet, annähern.

9.3.5 Rohrleichtbauformen in anderen Konstruktionsdisziplinen

Eignen sich diese seilverspannten Druckstäbe für großmaßstäbliche Elemente, wurden die Ansätze der Querschnittsoptimierung für Stahlrohre kleinerer Durchmesser für den Flug- und Fahrzeugbau systematisiert und den industriellen Produktionsbedingungen zugeführt. Wansleben's *Leichtbautechnik*³⁸ von 1937 sieht das Metallleichtbaurohr noch im Kontext der Hightech-Anwendung Luftfahrt, wohingegen Werner Kloth in seiner *Leichtbaufibel*³⁹ von 1947 die Anwendung auf seinen Fachbereich, den der Landmaschinen, ausgeweitet sieht. Die Herausstellung der positiven Eigenschaften dünnwandiger Stahlrohre folgt

³⁸ Wansleben: Leichtbautechnik, 1937

³⁹ Kloth: Leichtbaufibel, 1947

den gleichen Mustern. Es werden Vergleiche zu anderen Profilen in Bezug auf die Torsionsfestigkeit, Biegefestigkeit und Druckfestigkeit gezogen und strukturellen Maßnahmen vorgestellt, die unter anderem das lokale Beulen verhindern (Abb. IX. 19).

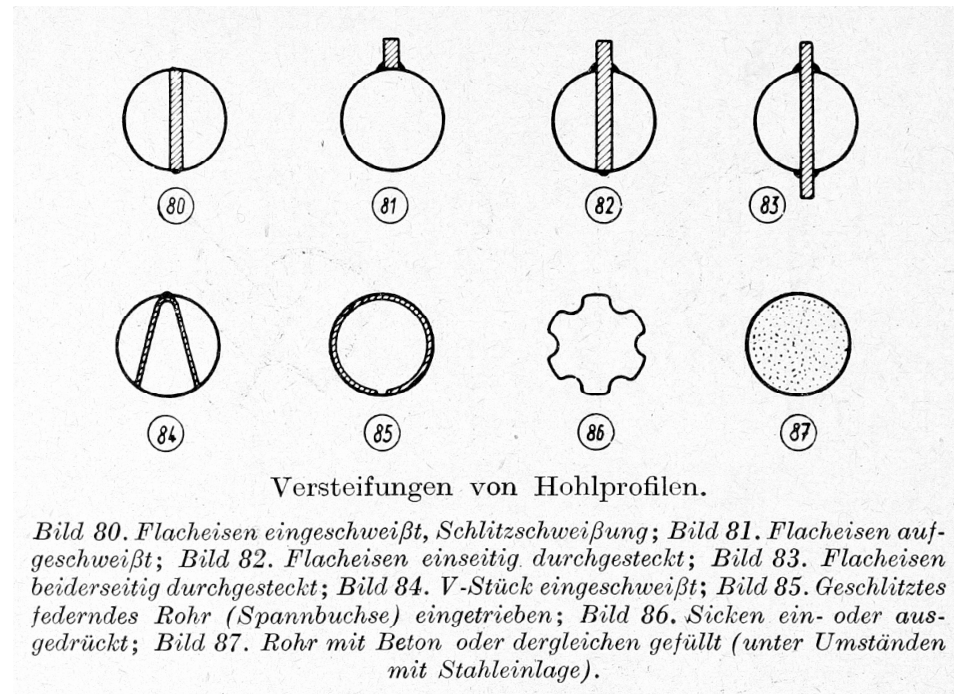


Abb. IX. 19: Versteifungen von Leichtbauhohlprofilen nach Kloth, 1947

Paul Sahmel⁴⁰ sieht die Vorbildfunktion der Natur für Leichtkonstruktionen noch 1983 gegeben, und jetzt, mit Abstand zum Zweiten Weltkrieg, vom Makel einer *Notlösung oder einer Sparmaßnahme in Stahlverknappungszeiten*⁴¹ befreit. Bei ihm wird der Leichtbau und seine Steigerung, der Ultraleichtbau, zu einer ästhetischen Kategorie, in der Rohre einen wesentlichen Beitrag haben:

„Bei gleicher Festigkeit und Stabilität nimmt die Leichtkonstruktion eine Rangstufe höherer Vollkommenheit ein. Hohlprofile eignen sich für diese Bauform besonders.“⁴²

Sahmels Artikel *Hohlquerschnitte in der Schweißtechnik* richtete sich an die konstruktiven Disziplinen des *Hoch-, Apparate- und Maschinenbaus* und wirkte indirekter Weise auf eine Applikation der Kaltprofile im Bauwesen hin. Im Bauwesen war mit der DIN 4115 und der angekündigten DIN 18 808 der Stahlleichtbau mit Hohlprofilen reguliert und somit faktisch auf die Werkstoffe St.37 und St.52 beschränkt. Für Kaltprofile lag dagegen eine 60% höhere Fließgrenze bei 40% Steigerung der Bruchgrenze vor, die die beiden Aspekte des Stoff- und Formleichtbaus

⁴⁰ Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983

⁴¹ Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983, S. 19

⁴² Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983, S. 19

erfüllt. Der Formleichtbau profitierte besonders von den Möglichkeiten, Kaltprofile lokal begrenzt auszustanzten oder verformen zu können, sodass Material an Stellen eingespart werden konnte, wo keine inneren Kräfte sich konzentrieren, und Bereiche der Kraftkonzentration hingegen beulsteifer (Abb. IX. 20) werden.

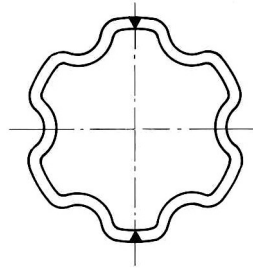


Abb. IX. 20: Geschlossener Querschnitt aus zwei Kaltprofilen, verschweißt, Sahmel 1983

Rundrohre für den konstruktiven Hochbau, mit ihren größeren Wandstärken, können durch Warmumformen in zwei Stufen dem strukturellen Konzept des Bambusrohres angeglichen werden.

Das sogenannte Knotenrohr⁴³ ersten Grades (Abb. IX. 21) wird in regelmäßigen Abständen meridional, bei induktive Erhitzung, gestaucht; die Wulstform kann sich nach außen, innen oder in beide Seiten abzeichnen, sie wirkt als Versteifungsrippe dem lokalen Beulen entgegen.

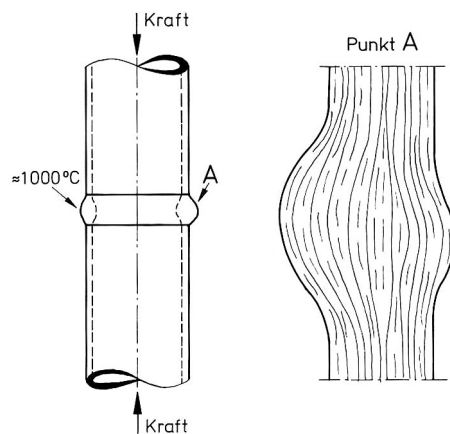


Abb. IX. 21: Wulstförmige Stauchung zum Knotenrohr Rohr mit Detail der Wulstbildung, Sahmel 1983

Eine Variante dieser Knotenrohre ersten Grades ist das Einbringen eines Diaphragmas. Im noch glatten Rohr wird ein Diaphragma (Abb. IX. 22) positioniert, das beim anschließenden Stauchungsprozess von der Wulstbildung kraftschlüssig umformt wird, wenn die Wulstbildung nach außen behindert wird.

⁴³ Siehe: Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983, S. 22

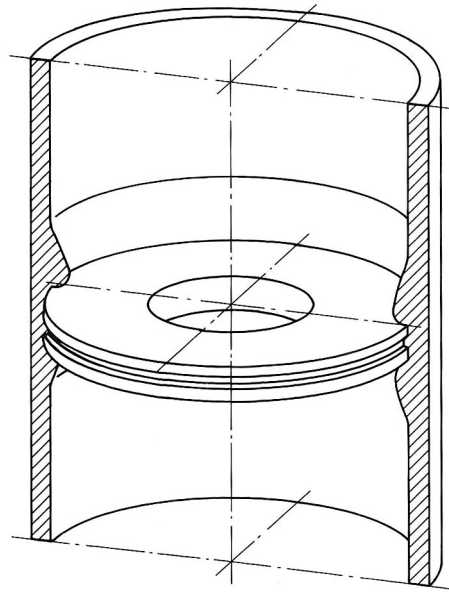


Abb. IX. 22: Knotenrohr mit Diaphragma, Sahmel 1983

Das Knotenrohr zweiten Grades erfüllt nach Sahmel sogar zwei Aspekte der Naturvorbilder:

„Trotzdem hat die Technik die Leistungen der Natur im Hinblick auf den Leichtbau bei weitem noch nicht erreicht. Einer der wichtigen Unterschiede ist: Bei allen röhrenförmigen "Bauteilen" der Tier- und Pflanzenwelt (Stengel[sic], Äste, Stämme, Röhrenknochen usw.) findet man nirgends glatte Wände; sie sind stets in der verschiedensten Weise verstärkt und meist mehrfach gekrümmt, [...]. Dieses "Prinzip" hat man sich teilweise im Leichtbau ebenfalls bereits zu eigen gemacht.“⁴⁴

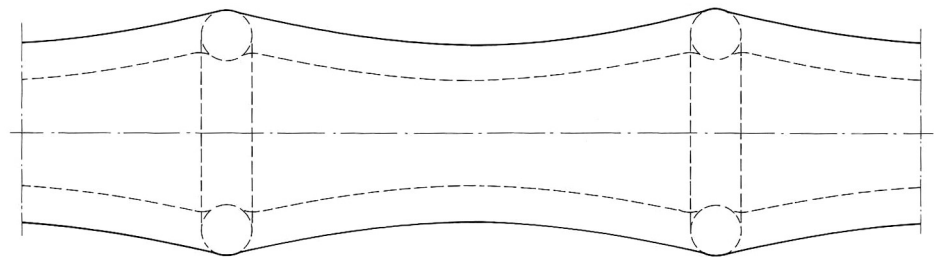


Abb. IX. 23: Knotenrohr mit doppelt gekrümmter Wand und offenen Nodien, Sahmel 1983

Dieses Knotenrohr in Abb. IX. 23 verdeutlicht das Prinzip der zweisinnig gekrümmten Mantelfläche in Form eines Rotationshyperboloids⁴⁵, alternierend mit Nodien – in diesem Fall mit offenen Nodien, die sich aber mit einem Diaphragma schließen ließen. Es ergibt sich eine hohe strukturelle Ähnlichkeit zum Bambusrohr.

⁴⁴ Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983, S. 22

⁴⁵ Siehe: Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983, S. 23

Dünnere Wandstärken bei großen Durchmessern können dagegen von der lokalen Kaltumformung profitieren, die getüpfelte (Abb. IX. 24), kalottierte oder gebuckelte Strukturen ermöglichen. Zweckmäßigerweise wird dazu zunächst ebenes Blech strukturiert und in einem zweiten Schritt zum Schlitzrohr umgeformt und durchgehend verschweißt.

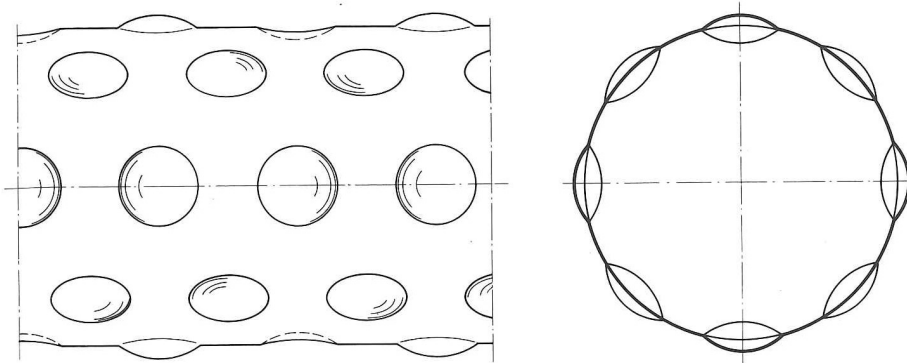


Abb. IX. 24: Rohr mit getüpfelter Wand, Sahmel 1983

Aber nicht jede Form der Strukturierung der Rohrwand, die zur lokalen Beulsicherheit beiträgt, ist geeignet, das Rohr als Druckstab zu optimieren. Das sogenannte Sickenrohr⁴⁶ (Abb. IX. 25) ist dem Knotenrohr strukturell sehr ähnlich, die Sicken wirken aber bei Längsdruckkraft wie ein Balgenkompendium – der Druckstab wird zusammengeschoben.

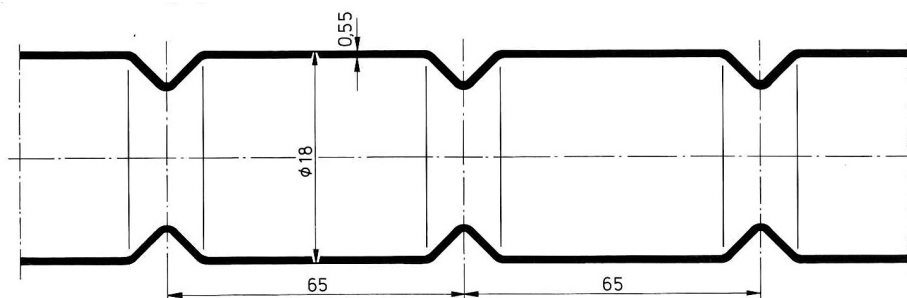


Abb. IX. 25: Sickenrohr, Sahmel 1983

Eine weitere Möglichkeit, dünnwandige Rohre zu stabilisieren, besteht darin, indem meridional Strukturen aufgeschweißt werden, die ein günstiges Flächenträgheitsmoment aufweisen, oder selbst zweisinnig gekrümmt sind. Diese äußere Anordnung wird dann besonders bevorzugt, wenn der Innendurchmesser zum Transport von Medien genutzt werden soll (Abb. IX. 26). Beim sogenannten *Flossenrohr* sind die äußeren Rippen aber aus rein thermodynamischen Gesichtspunkten angeordnet, um eine möglichst große Fläche für den Wärmeübertrag zu erzielen.

⁴⁶ Siehe: Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983, S. 22

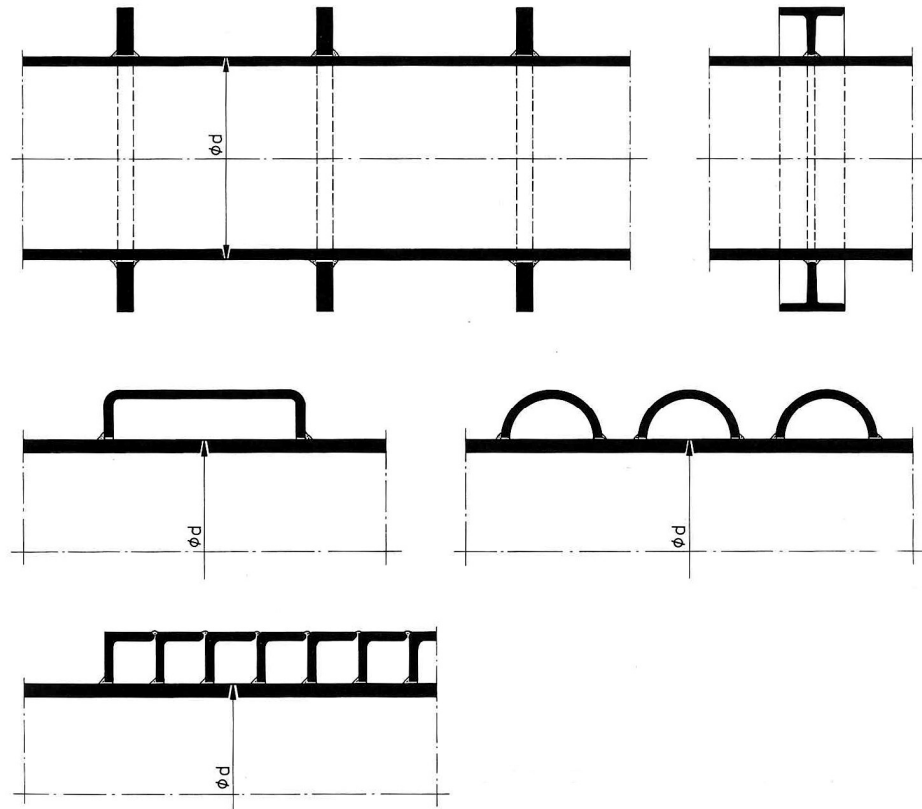


Abb. IX. 26: Rohre mit umlaufenden externen Verstärkungen, Sahmel 1983

Auch eine Anordnung der Verstärkungsrippen in Längsrichtung von Hohlstäben ist in der Natur zu beobachten, wie z.B. bei Stacheln⁴⁷ (Abb. IX. 27)

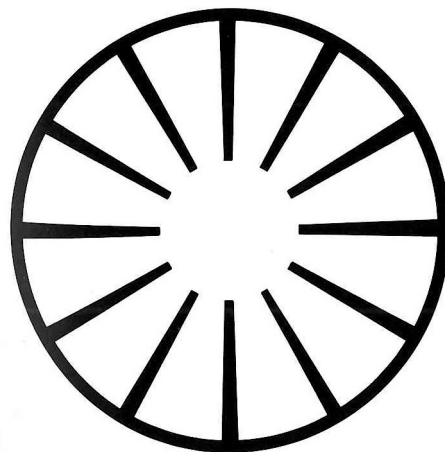


Abb. IX. 27: Querschnitt durch den Stachel eines Igels, Sahmel 1983

Diese Anordnung scheint aber eher bei kleinen Durchmessern dem Prozess des Strangpressens zu entsprechen, wie er bei Aluminiumprofilen angewendet wird. Eine Anwendung sieht Sahmel für diese Bauart

⁴⁷ Siehe: Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983, S. 23

in Abb. IX. 28 im Offshore⁴⁸ Bereich mit seinen Großrohr-Strukturen, wo die Querschnitte eine elementierte Bauweise gestatten.

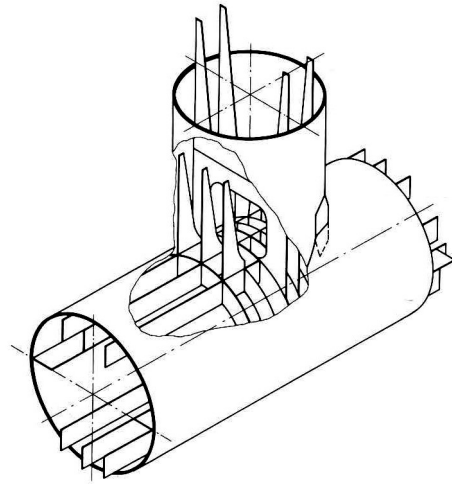


Abb. IX. 28: Versteifter T-Stoß zweier Großrohre, Sahmel 1983

⁴⁸ Siehe: Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983, S. 23

Abbildungsverzeichnis Kapitel 9:

- Abb. IX.1: Historische Gussstütze mit deutlichem Kernversatz, Botanischer Garten Dublin, ca. 1840. Aus: Verfasser, Botanischer Garten Dublin, 2007
- Abb. IX. 2: Deutlicher Kernversatz durch Auftriebskräfte bei der Gussstütze aus IX. 1. Aus: wie Abb. IX. 1.
- Abb. IX. 3: Zerstörter Brückenpfeiler aus Gussstützen der Eisenbahnbrücke über den Firth of Tay, 1879. Aus: Unbekannt - <http://digital.nls.uk/74585094>Pier no. 4: looking south. Photograph of a wrecked pier after collapse of part of the first Tay Bridge. Pfeiler Nr. 4: Blick nach Süden. Bild eines zerstörten Pfeilers nach Zusammenbruch eines Teils der ersten Tay-Brücke.https://de.wikipedia.org/wiki/Firth-of-Tay-Br%C3%BCcke#/media/File:Tay_Rail_Bridge-NLS-18.jpg, 12.03.2018, 17:35
- Abb. IX. 4: Körperform von gleicher rückwirkender Festigkeit für den ringförmigen Querschnitt, Redtenbacher 1876. Aus: Klasen, Ludwig: Handbuch der Hochbau-Constructionen in Eisen und anderen Metallen für Architekten, Ingenieure, Constructeure, Bau-Handwerker und Technische Lehranstalten. Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1876, reprint 1981, Edition libri rari Th. Schäfer, Hannover, S. 136
- Abb. IX. 5: Theoretische Form der Säule gegen Ausknicken links und praktische Form rechts nach Königer, 1902. Aus: Königer, Otto: Die Konstruktion in Eisen. Bd. II, 6. Vermehrte u. umgearbeitete Auflage, gebhardt's Verlag, Leipzig, 1902, reprint 1993, Edition libri rari Th. Schäfer, Hannover, Hrg. Breymann, G. U.: Allgemeine Baukonstruktionslehre mit besonderer Beziehung auf das Hochbauwesen : Ein Handbuch zu Vorlesung und zum Selbstunterricht, 4 Bd., S. 66
- Abb. IX. 6: Architektonische Formgebung einer Pendelstütze der Berliner Stadtbahn. Monatskonkurrenz März 1880. Aus: Architekturmuseum TU Berlin, Permalink: <http://deutschefotothek.de/documents/obj/71134858>, © Architekturmuseum der Technischen Universität Berlin in der Universitätsbibliothek
- Abb. IX. 7: Spross des Winter-Schachtelhalms (*Equisetum hiemale*), Blossfeldt 1929. Aus: Blossfeldt, Karl: Urformen der Kunst : Photographische Pflanzenbilder. Wasmuth, Berlin, 1929, S. 1
- Abb. IX.7a: Proportionsstudie in der BOL, 1943. Aus: Neufert, Ernst: Bauordnungslehre. Hrsg. Albert Speer, Volk und Reich Verl., Berlin, 1943, S.46
- Abb. IX. 8: Halmquerschnitt des Winter-Schachtelhalms (*Equisetum hiemale*), Blossfeldt 1929. Aus: Blossfeldt, Karl: Urformen der Kunst : Photographische Pflanzenbilder. Wasmuth, Berlin, 1929, S. 4
- Abb. IX. 9: Querschnitte von Leichtbaustahlrohren, Fritz Leonhardt 1940. Aus: Leonhardt, Fritz: Leichtbau – eine Forderung unserer Zeit. Anregungen für den Hoch- und Brückenbau. In: Die Bautechnik : Fachschrift für das gesamte Bauingenieurwesen. Jhg. 18, Heft 36-37, S. 413-423, 1940, S. 414
- Abb. IX. 10: Analogievorbild Querschnitt durch einen Strohalm, Fritz Leonhardt 1940. Aus: Leonhardt, Fritz: Leichtbau – eine Forderung unserer Zeit. Anregungen für den Hoch- und Brückenbau. In: Die Bautechnik : Fachschrift für das gesamte Bauingenieurwesen. Jhg. 18, Heft 36-37, S. 413-423, 1940, S. 413
- Abb. IX. 11: Stahlersparnis bei Druckstäben aus Rohren, Leonhardt 1940. Aus: Leonhardt, Fritz: Leichtbau – eine Forderung unserer Zeit. Anregungen für den Hoch- und Brückenbau. In: Die Bautechnik : Fachschrift für das gesamte Bauingenieurwesen, Jhg. 18Heft 36-37, S. 413-423, 1940, S. 413
- Abb. IX. 12: Leichtbaukennzahlen schlanker Hohlstäbe, Mengerinhausen. Aus: Mengerinhausen, Max: Das Prinzip des Leichtbaues und seine Bewertung in Natur und Technik. In: VDI-Zeitschrift, S. 523-527, Jg.102, Nr. 13, Mai, 1960, S. 526
- Abb. IX. 13: Eléments Tubulaires ISOFLEX, Le Ricolais 1930er Jahre. Aus: o.A.: Things Themselves Are Lying, And So Are Their Images : Interviews with Robert Le Ricolais. S. 81-109, In: Structures Implicit and Explicit, Hrg. Bryan, James and

Sauer, Rolf, Graduate School of Fine Arts, University of Pennsylvania, Wittenborn & Company, Philadelphia, 1973, S. 100

- Abb. IX. 14: Automorphe Röhre nach Belastungsprobe, Le Ricolais 1960er Jahre. Aus: o.A.: Things Themselves Are Lying, And So Are Their Images : Interviews with Robert Le Ricolais. S. 81-109, In: Structures Implicit and Explicit, Hrg. Bryan, James and Sauer, Rolf, Graduate School of Fine Arts, University of Pennsylvania, Wittenborn & Company, Philadelphia, 1973, S. 102
- Abb. IX. 15: Bimorphes *Lemniscate*, Seilnetzverspannter Hohlstab, Le Ricolais 1960er Jahre. Aus: o.A.: Things Themselves Are Lying, And So Are Their Images : Interviews with Robert Le Ricolais. S. 81-109, In: Structures Implicit and Explicit, Hrg. Bryan, James and Sauer, Rolf, Graduate School of Fine Arts, University of Pennsylvania, Wittenborn & Company, Philadelphia, 1973, S. 94
- Abb. IX. 16: Seilverspanntes 45 m Teleskop Johannes Hevelius, 17. Jhd. Aus: Hevelius, Johannes: *Johannis Hevelii machinae coelestis pars prior; organographiam, sive instrumentorum astronomicorum omnium, quibus Auctor hactenus Sidera rimatus, ac dimensus est, accuratam delineationem, et descriptionem, plurimis iconibus, aeri incisus, illustratam & exornatam, exhibens: cum aliis quibusdam, tam jucundis, quam scitu dignis, ad mechanicam, opticamque artem pertinentibus* Gedani. 1673, ETH-Bibliothek Zürich, Shelf Mark: Rar 9646 GF, Persistent Link: <http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-557>, 1673, S. 411
- Abb. IX. 17: Seilverspannte Druckstäbe für eiserne Brückenbauten, Whipple 1847. Aus: Whipple, Squire, C. E.: Essay N° II on Bridge Building given Practical Details and Plans for Iron and Wooden Bridges. In: A Work on Bridge Building : Consisting of two Essays, the one Elementary and General, the Other Giving Original Plans, and Practical Details for Iron and Wooden Bridges. Hrg. Whipple, Squire, C. E., H. H. Curtiss, Utica, N. Y., 1847, Tafel IV
- Abb. IX. 18: Gliederung des seilverspannten Druckstabs nach Schock, 1976. Aus: Schock, Hans-Joachim: Untersuchungen zur Tragfähigkeit von seilverspannten Druckstäben. In: Forschungsberichte aus dem Institut für Tragkonstruktionen u. konstr. Entwerfen Universität Stuttgart, N° 4, Dissertationsschrift mit dem Titel: Untersuchungen zur Tragfähigkeit von seilverspannten Druckstäben durch geometrisch nichtlineare Berechnung mit finiten Stabelementen. Universität Stuttgart, 1976, S. 25
- Abb. IX. 19: Versteifungen von Leichtbauhohlprofilen nach Kloth, 1947. Aus: Kloth, W.: Leichtbaufibel : eine Anleitung zur Stahleinsparung im allgemeinen Maschinenbau. Verlag Hellmut Neureuter, München-Wolfratshausen, 1947, S. 54
- Abb. IX. 20: Geschlossener Querschnitt aus zwei Kaltprofilen, verschweißt, Sahmel 1983. Aus: Sahmel, Paul: Hohlquerschnitte in der Schweisstechnik: Beispiele zur Gestaltung und Anwendung geschweisster Hohlquerschnitte im Hoch-, Apparate- und Maschinenbau. DVS Media, 1983, S. 19
- Abb. IX. 21: Wulstförmige Stauchung zum Knotenrohr Rohr mit Detail der Wulstbildung, Sahmel 1983. Aus: Sahmel, Paul: Hohlquerschnitte in der Schweisstechnik: Beispiele zur Gestaltung und Anwendung geschweisster Hohlquerschnitte im Hoch-, Apparate- und Maschinenbau. DVS Media, 1983, S. 22
- Abb. IX. 22: Knotenrohr mit Diaphragma, Sahmel 1983. Aus: Sahmel, Paul: Hohlquerschnitte in der Schweisstechnik: Beispiele zur Gestaltung und Anwendung geschweisster Hohlquerschnitte im Hoch-, Apparate- und Maschinenbau. DVS Media, 1983, S. 22
- Abb. IX. 23: Knotenrohr mit doppelt gekrümmter Wand und offenen Nodien, Sahmel 1983. Aus: Sahmel, Paul: Hohlquerschnitte in der Schweisstechnik: Beispiele zur Gestaltung und Anwendung geschweisster Hohlquerschnitte im Hoch-, Apparate- und Maschinenbau. DVS Media, 1983, S. 22
- Abb. IX. 24: Rohr mit getüpfelter Wand, Sahmel 1983. Aus: Sahmel, Paul: Hohlquerschnitte in der Schweisstechnik: Beispiele zur Gestaltung und Anwendung geschweisster Hohlquerschnitte im Hoch-, Apparate- und Maschinenbau. DVS Media, 1983, S. 23

- Abb. IX. 25: Sickenrohr, Sahmel 1983. Aus: Sahmel, Paul: Hohlquerschnitte in der Schweisstechnik: Bei-spiele zur Gestaltung und Anwendung geschweisster Hohlquerschnitte im Hoch-, Apparate- und Maschinenbau. DVS Media, 1983, S. 23
- Abb. IX. 26: Rohre mit umlaufenden externen Verstärkungen, Sahmel 1983. Aus: Sahmel, Paul: Hohlquerschnitte in der Schweisstechnik: Bei-spiele zur Gestaltung und Anwendung geschweisster Hohlquerschnitte im Hoch-, Apparate- und Maschinenbau. DVS Media, 1983, S. 23
- Abb. IX. 27: Querschnitt durch den Stachel eines Igels, Sahmel 1983. Aus: Sahmel, Paul: Hohlquerschnitte in der Schweisstechnik: Bei-spiele zur Gestaltung und Anwendung geschweisster Hohlquerschnitte im Hoch-, Apparate- und Maschinenbau DVS Media, 1983, S. 23
- Abb. IX. 28: Versteifter T-Stoß zweier Großrohre, Sahmel 1983. Aus: Sahmel, Paul: Hohlquerschnitte in der Schweisstechnik: Bei-spiele zur Gestaltung und Anwendung geschweisster Hohlquerschnitte im Hoch-, Apparate- und Maschinenbau. DVS Media, 1983, S. 23

10.0 Biegeeweiche Stäbe in Natur und Technik

Der steife Stab hat seine Berechtigung im konstruktiven Hochbau, und wird von den Bauingenieuren umfassend beherrscht. Es konnte gezeigt werden, dass das kreisrunde Stahlhohlprofil sowohl in seiner Gestaltform als auch in seinen Werkstoffvarianten dem idealen Pendelstab sehr nahekommt und als Halbzeug wirtschaftlich ist. Darüber hinaus stehen weitere Optimierungsstrategien der Gestaltform oder durch Bildung von Hybriden auf Grundlage von Hohlprofilen für Druckstäbe zur Verfügung, die sich an dem Wirkungsprinzip des geraden, steifen Stabes orientieren. Es lassen sich aus steifen Stäben zusammengesetzte, ebene und räumliche, Tragstrukturen mit lösbaren Knotenpunkten kombinieren, deren Steifigkeit nicht mehr von der Steifigkeit des einzelnen Stabelementes bestimmt wird, als vielmehr durch die Verschiebbarkeit der Knotenpunkte, bedingt durch fertigungstechnische Toleranzen. Die Gesamtsteifigkeiten erreichen aber ein ausreichendes Niveau, um Verformungen zu begrenzen, die beispielsweise der Gebrauchstauglichkeit entgegenstehen.

Die Biegesteifigkeit eines Elementes lässt sich, bei linear-elastischem Verhalten, über das Produkt aus dem E-Modul und dem Flächenträgheitsmoment und die Dehnsteifigkeit über das Produkt aus dem E-Modul und der Querschnittsfläche beschreiben. Das E-Modul E ist eine werkstoffgebundene Eigenschaft, das den linearen Zusammenhang aus Belastung und reversibler Verformung beschreibt:

Zu Gl. X. 1:
Z.B. ein Hohlprofil 168,3x6 von 450 cm Länge wird bei Erreichen von $\sigma_{zul} = 21,8 \frac{kN}{cm^2}$ u. einem E-Modul von $E = 21\,000 \frac{kN}{cm^2}$ um 4,7 mm gestaucht. Nicht berücksichtigt sind temperaturbedingte Längenänderungen oder der Einfluss des Eigengewichtes. Die zulässige Belastung fällt in der Praxis deutlich geringer aus, da die Traglast die Knickgefahr berücksichtigt und die σ_{zul} nochmals deutlich reduziert.

Gl. X. 1

$$E \left[\frac{N}{mm^2} \right] = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

Bei einem zentrisch belasteten Druckstab tritt unterhalb der Eulerlast, bzw. zulässigen Spannung, somit immer eine geringe Stauchung als Resultat der Dehnsteifigkeit ein, die bei den üblichen Baustoffen aber unterhalb der Wahrnehmungsgrenze liegt.

Ändert man die Belastungsrichtung quer zur Stabachse, ist die Biegesteifigkeit maßgebend: Unterhalb der zulässigen Spannungen wird eine deutlich wahrnehmbare, reversible Verformung sich einstellen.

Für die überwiegende Mehrzahl der stabförmigen Elemente der Natur, von der Mikro-Maßstabsebene der pflanzlichen und tierischen Fasern, über die Meso-Maßstabsebene der dünnen Zweige, zur Makro-Maßstabsebene der Baumstämme, liegt ein sichtbar elastisches Verhalten bei Biegebeanspruchung vor, das es den Strukturen ermöglicht, auf zeitlich begrenzte Belastungsspitzen zerstörungsfrei zu reagieren. Die-

ses elastische Verhalten ist auf der Mikro-Maßstabsebene bis heute Voraussetzung zur Gewinnung von Textilien¹ aus Kurzfasern, wie z.B. Wolle (Keratin) oder Hanf (Cellulose). Auf der Meso-Maßstabsebene haben sich Anwendungen, wie das Flechten bei Korbwaren und Möbeln erhalten; das Flechtwerk im Fachwerkbau ist dagegen in den entwickelten Regionen auf Reparaturen beschränkt.

Unter der Makro-Maßstabsebene können alle pflanzlichen Triebe, Äste und Stämme zusammengefasst werden, die ein deutliches, elastisches Verhalten aufweisen, aber sich aufgrund ihrer Größe nicht mehr einem Flecht- oder Webprozess manuell zuführen lassen.

Einen Sonderfall stellen die reziproken Tragstrukturen dar, die sowohl aussteifen als auch aus biegeweichen Stäben gebildet werden können und in ihrer Anordnung der Stäbe untereinander dem Flechtwerk nahestehen (Abb. X. 1).

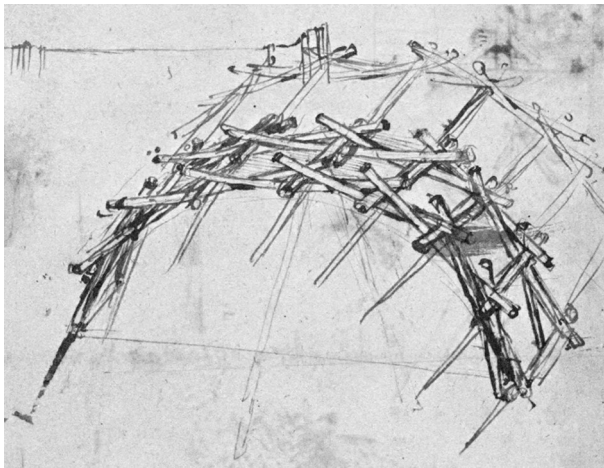


Abb. X. 1: Brücke aus Flechtstabwerk als reziprokes System, Leonardo da Vinci

Die minimale Konstituierung eines Flechtstabwerkes kann aus drei Stabelementen erfolgen (Abb. X. 2), auch hier ist kennzeichnend die gegenseitige Verklemmung unter zur Hilfenahme der Reibung, sodass keine Verbindungsmittel oder besonders ausgeformte Berührungspunkte notwendig sind.

¹ Siehe: Beech/Farnfield et al.: Textile Terms, 1986

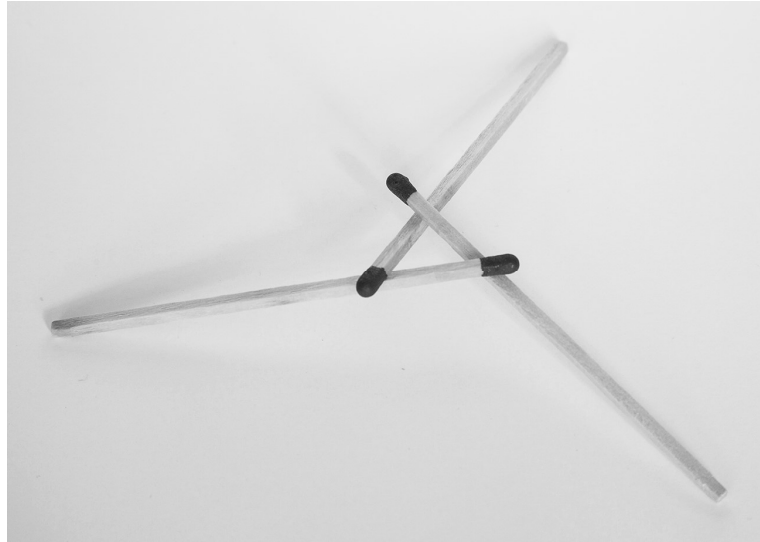


Abb. X. 2: reziprokes Modul mit Mindestanzahl der Stabelemente

Unabhängig von den reziproken Strukturen können aus den Elementen der Makro-Maßstabsebene Tragstrukturen gebildet werden, die schlanke, elastische Stäbe mit eingprägter Vorverformung zum Lastabtrag heranziehen (Abb. X. 3).

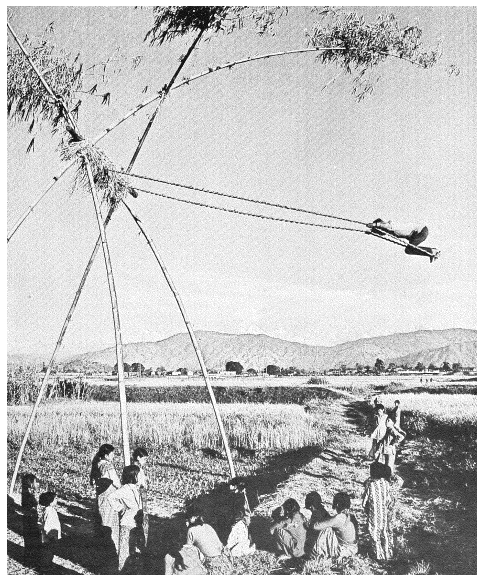


Abb. X. 3: Kinderschaukel aus biegsamen Bambusrohren, IL 31

Die Kinderschaukel aus Bambusrohr in der Abb. X. 3 reagiert auf die dynamische und statische Belastung mit sichtbaren Verformungen, und erfüllt dennoch ihre Gebrauchstauglichkeit im Kontext der soziokulturellen Rahmenbedingungen. Es ist aber zu beobachten, dass diese Art der Konstruktionen ressourcenbedingt ist und sich heute auf Regionen beschränkt, wo das natürliche Baumaterial ubiquitär und deutlich günstiger, wenn nicht sogar alternativlos ist².

² Siehe: Lienhard/Alpermann et al.: Active Bending, 2013, S. 190

Die Abb. X. 4 zeigt auf der linken Seite eine vernakuläre Brücke. Zur Anwendung kamen auch hier Bambusstangen, die hier in Teilbereichen als biegeeweiche Stäbe mit eingepprägter Vorverformung tragende Funktionen haben. Das gesamte Brückenbauwerk reagiert bei Belastung mit spürbaren Verformungen, und ein Versagen kündigt sich durch zunehmende Verformungen frühzeitig an. Im Kontrast dazu ist das Brückenbauwerk auf der rechten Seite der Abb. X. 4 als Hängewerk aus massiven, steifen Holzstämmen gefertigt. Die beiden Schenkel jedes der zwei Hängewerke sind starre, druckbeanspruchte Stäbe, die stabilitätsgefährdet sind und durch Ausknicken spontan versagen können. Der Hängestab ist dagegen in Form eines schlanken Zugelementes funktional differenziert ausgeführt; Fahrbahn und Querträger der Hängestäbe sind vorwiegend auf Biegung beansprucht.

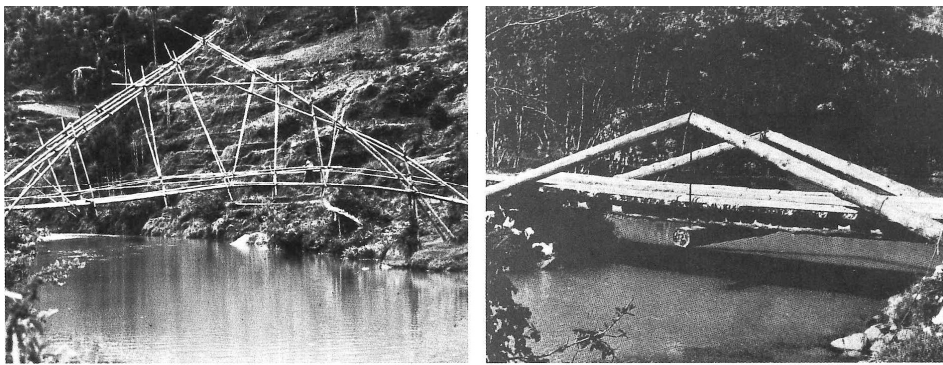


Abb. X. 4: links vernakuläre, biegeeweiche Bambusbrücke; rechts Hängewerkbrücke mit steifen Druckstreben, IL 31

Beide Beispiele aus sehr schlanken Bambusrohrstäben in den Abb. X. 3 und Abb. X. 4 sind zunächst ein Nachweis, dass gebrauchsfähige Konstruktionen auf Grundlage von biegeweichen Stäben mit eingepprägter Vorverformung möglich sind. Es ist an dieser Stelle aber anzumerken, dass diese Konstruktionen auf empirische Weise mit dem Tragverhalten der biegeweichen Stäbe umgehen, ohne deren mögliche strukturelle Vorteile aktivieren zu können.

10.1 Der Stab als mechanische Feder

In der technischen Anwendung erfahren die stabförmigen Elemente, besonders der Meso-Maßstabsebene, bei ausgeprägt elastischem Verhalten eine Funktionsverschiebung zur mechanischen Feder, die ihre prähistorische Anwendung im Pfeilbogen mit gespannter Bogensehne fand. So konnte bei Ahrensburg in Schleswig-Holstein in den frühen

1940er Jahren Reste von Jagdwaffen (Abb. X. 5) aus der Alt- und Mittelsteinzeit nachgewiesen werden³.

Zu Abb. X. 5:

Die ältesten Hinweise, in Form von Feuersteinspitzen für Bogenpfeile, sind rund 64 000 Jahre alt.

Vgl.: Lombard/Phillipson: bow and stone-tipped arrow, 2015

Die hier abgebildeten Fragmente wurden bei Grabungen im Stellmoor bei Ahrensburg/Hamburg gefunden und auf ca. 6000 v.Chr. datiert und gelten als älteste direkte Hinweise auf Bogenwaffen.

Rust: Stellmoor, 1943



Abb. X. 5: Fragmente von Bogen-Wurfarmen aus Kiefernholz aus dem Stellmoor

Der primitive Pfeilbogen wurde ursprünglich aus einem Stück biegsamen Holzes gefertigt, wobei das Mittelstück mit dem Griffbereich deutlich stärker ausgeformt war und zu den Enden der Wurfarme abnahm. In der Abb. X. 5 erkennt man deutlich am äußeren Ende der Wurfarmfragmente die Schlitz/Nute (Bogennocken) zur Aufnahme der Schlinge (Öhrchen) der Bogensehne.

Der bespannte Pfeilbogen kann als eine frühe Maschine aufgefasst werden⁴, die langsame mechanische Arbeit in Form von potentieller Energie speichert und diese schlagartig als Beschleunigungsarbeit wieder freisetzt. Bei einem idealisierten Modell wird einem geraden, elastischen Stab eine Bogenform eingeprägt und diese durch das Anlegen eines Zuelementes (Sehne) gehalten; entfernt man die Sehne, wird die gespeicherte Spannenergie den Stab in seine gerade Ausgangsform zurückverformen. Der elastisch verformte Stab und das Zuelement bilden ein geschlossenes System, das nach außen kräftefrei bleibt.

Zum Abschuss eines Pfeils wird der bespannte Pfeilbogen ausgezogen und die Spannenergie deutlich erhöht (Abb. X. 6a), die beim Auslösen Beschleunigungsarbeit am Pfeil verrichtet und den Pfeilbogen in seine bespannte Ausgangsform zurückführt. Voraussetzung ist die Verformung des Stabes im elastischen Bereich in allen Zustandsphasen.

Anm. zu 4:

Die Idealisierung dieses Modells vereinfacht die zu beobachtenden Effekte stark. So ist bei der Mehrzahl der Werkstoffe eine mehr oder minder starke Hysterese zu beobachten, sodass sichtbare Restverformungen bestehen bleiben. Eine genaue energetische Betrachtung würde dies berücksichtigen. Es bleiben auch z.B. die Relaxion durch Dehnung der Sehne oder Temperatureinflüsse unberücksichtigt.

³ Siehe: Rust: Stellmoor, 1943

⁴ Siehe: Kinseher: Der Bogen, 2005

Das Kraft-Weg-Diagramm eines traditionellen Stabbogens im Arbeitsbereich (x_{max}) verhält sich zur proportionalen Geraden einer idealen Feder leicht konkav, kann aber mit der Formel⁵ genähert werden:

Gl. X. 2

$$E_{pot} = \int_0^{x_{max}} F(x) dx \approx \frac{1}{2} k x^2$$

Die Spannenergie, hier E_{pot} , kann als Dreiecksfläche unterhalb des Graphen genähert ermittelt werden, wobei k die Federkonstante ist.

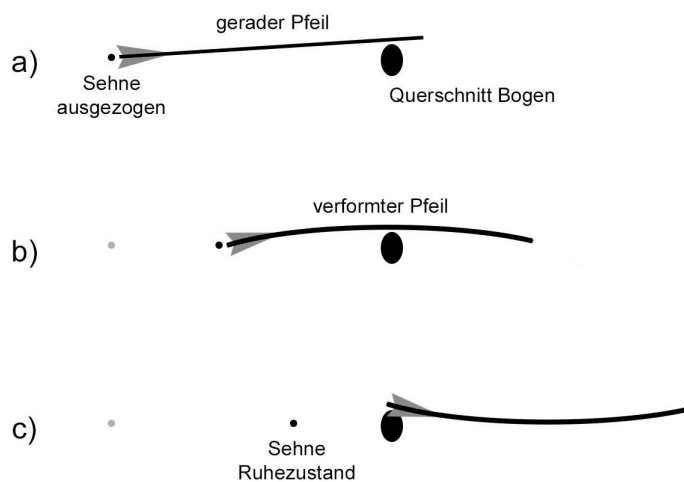


Abb. X. 6: Schema zur elastischen Verformung des Pfeils beim Auslösen, Archer's Paradox nach Klopsteg

Der Pfeil ist ein stabförmiges Projektil, bestehend aus Spitze, Schaft und befiedertem Ende mit einer Nocke zur Aufnahme der Sehne. Die mechanischen Anforderungen an den Schaft sind Leichtigkeit, Festigkeit und Elastizität. Die Elastizität ist notwendig, da die Beschleunigungsarbeit die Massenträgheit des Pfeils überwinden muss, die bei der schnellen Bewegung der Sehne zu starken oszillierenden transversalen Verformungen des Schaftes führt (Abb. X. 6b-c). Diese Verformungen ermöglichen es erst, mit einem Pfeilbogen ohne *Schussfenster* gerade zu schießen, da Bogen und Sehne in einer Ebene liegen und der Pfeil zentrisch an der Sehne anliegt, aber gegen den linken oder rechten Rand des Bogens gehalten wird (Abb. X. 6a).

Ausgehend von primitiven Stabbogen wurden in der Folge auch größere Katapulte auf dem Prinzip der Spannenergie hölzerner Stäbe entwickelt und eingesetzt. Leonardo da Vinci räumt diesen Maschinen einen breiten Raum in seinen Studien ein.

Zu Abb. X. 6:

Traditionelle Bögen, wie hier schematisch dargestellt, sind nur mit genau abgestimmter Elastizität der Pfeile arbeitsfähig, da die Verformung ausreichend stark sein muss, um den Bogen umkurven zu können; ist dagegen die Elastizität zu hoch, wird die oszillierende Verformung nicht schnell genug gedämpft und es kann sich keine *pfeilgerade* Flugbahn einstellen.

Das *Schussfenster* ist eine konstruktive Maßnahme bei modernen Bogen, die es ermöglicht, dass Sehne, Pfeil und Mittelachse des Bogens in einer Ebene liegen. Hierzu wird im Mittelteil des Bogens das Material exzentrisch von der Bogenachse angeordnet. Voraussetzung hierfür war der Einsatz moderner Holzwerkstoffe oder Leichtmetalllegierungen.

⁵ Siehe: Sudhues: Pfeilverletzungen, 2004, S. 41

Fortsetzung zu Abb. X. 6: Es handelt sich beim Bogenschießen um eine sehr traditionelle Technologie, deren Hochzeit am Ende des Mittelalters mit den englischen Langbögen verortet wird. War der Anspruch an die Fähigkeiten des Schützen sehr hoch, so waren auch die technischen Parameter umfänglich bekannt, ohne jedoch sich vertiefter Kenntnisse der Naturgesetze bzw. der SI-Einheiten bedienen zu können. Zu Anwendung kamen die historisch messbaren Größen Gewicht und Strecke in den traditionellen englischen Maßen Pfund und Zoll, die noch heute zur Klassifizierung im Bogensport gelten. So wird das Zuggewicht als die Haltekraft bei einem Standardauszug von 28“ in lbs angegeben, die Elastizität des Pfeiles als Durchbiegung mit dem Spine-Wert in 1/1000“ angegeben. Hierzu wird der Pfeil im Abstand von 26“ gestützt und mit 2lbs mittig belastet. Die Durchbiegung in der Mitte des Pfeils von Unterkante zu verformter Unterkante ist der *Spine*. Es handelt sich hierbei um den wohl ältesten 3-Punktbiegeversuch unter normierten Bedingungen.

Der bespannte Bogen wurde vermutlich schon in der Steinzeit zur Erzeugung von Tönen genutzt und entwickelte sich zum Ein-Saiteninstrument, dem sogenannten *Musikbogen*⁶, unabhängig von den Pfeilbögen, weiter, und wurde durch einfache Resonanzkörper aus getrockneten, hohlen Fruchtkörpern am Bogen ergänzt.

Neben der olympischen Disziplin des Bogenschießens ist es auch der Stabhochsprung, der sich elastischer Stäbe bedient, um kinetische Energie aus dem Anlauf in Spannenergie des Stabes zu transformieren, die wiederum Hebearbeit am Sportler zur Überwindung der Latte verrichtet.

Ein anderes traditionelles Jagdgerät sind Angelruten, deren Flexibilität das Reißen der Angelschnur bei plötzlicher Belastung abfedert und das waidgerechte *Drillen* des Fanges erleichtert.

Es konnte gezeigt werden, dass stabförmige Elemente aus Holz bereits in frühgeschichtlicher Zeit, der Dichotomie des Stabes entsprechend, als federnde Elemente zur Anwendung kamen. Hierbei sind große Verformungen im elastischen Bereich zulässig oder sogar erwünscht.

Der elastische Stab ist daher die älteste Bauform einer mechanischen Feder: die Biegefeder.

Eine Feder ist ein elastisches Bauteil, das Energie speichern und mechanische Arbeit leisten kann. Federn können nach dem Werkstoff (Metall, Polymer etc.), der Werkstoffbeanspruchung (Zug, Druck, Biegung und Torsion) und in Anlehnung an die Gestalt (Schrauben, Stab, Teller etc.) charakterisiert werden.⁷ Die mechanischen Eigenschaften einer Feder lassen sich über die Federkonstante k und die Federkennlinie (Abb. X. 7) beschreiben. Grundsätzlich kann zwischen Translations- und Rotationsfedern unterschieden werden.

⁶ Siehe: Kinseher: Der Bogen, 2005

⁷ Siehe: Wittel/Muhs: Maschinenelemente, 2015, S. 321

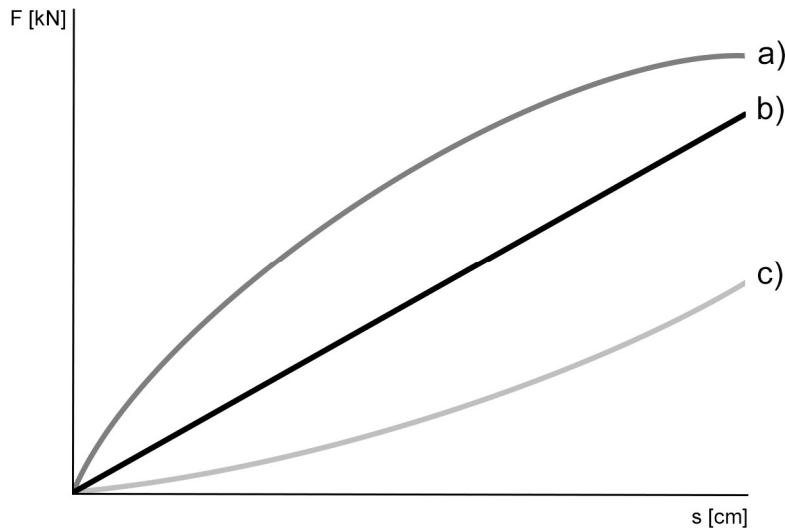


Abb. X. 7: Schematische Federkennlinien hier für Translationsfedern, a) degressiv, b) linear und c) progressiv

Robert Hooke (1635–1703) erfasste den Zusammenhang von Dehnung und Kraft bei Federn als erster experimentell genau genug, um daraus ein ideales, lineares elastisches Verhalten abzuleiten, dass er im Ausdruck *ut tensio sic vis*⁸ treffend zusammenfasste:

Gl. X. 3

$$F = k \cdot \Delta l$$

Ein wesentliches Merkmal ist auch die Größe der *Hysteresese*, die den Federwirkungsgrad η_F kennzeichnet:⁹

Gl. X. 4

$$\eta_F = \frac{W_E}{W_B} < 1$$

Federn kommen nach wie vor in Maschinen und technischen Anlagen zur Anwendung und werden als Konstruktionselemente in der Fachliteratur beispielhaft bei Meissner historisch¹⁰ und anwendungsbezogen¹¹ umfassend dargestellt.

Zu Gl. X. 3:

k ist die Federkonstante, sie entspricht der Steigung des geraden Graphen bei linearem Verhalten und hat die Einheit $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$

Zu Gl. X. 4:

$\eta_F \approx 1$ wird für Federn als Energiespeicher angestrebt, $\eta_F \ll 1$ für Federn als Stoß- und Schwingungsdämpfer

⁸ Siehe: Hooke: De Potentia Restitutiva, 1678

⁹ Siehe: Wittel/Muhs: Maschinenelemente, 2015, S. 325

¹⁰ Siehe: Meissner: Geschichte der Metallfedern, 2009

¹¹ Siehe: Meissner/Wanke et al.: Handbuch Federn, 1993

10.2 Der Stab als federndes Tragstrukturelement

Demgegenüber ist die praxisbezogene Aneignung der elastischen, schlanken Stäbe mit ihren federnden Eigenschaften auf das traditionelle vernakuläre Bauen beschränkt und stark rückläufig. Hierzu können die Jurten-Zelte aus Zentralasien oder die Schilfbündel-Bauten¹² aus Mesopotamien gezählt werden, die den zuvor genannten Bambusbauweisen in anderen Regionen der Erde ähnlich sind¹³.

Diese anonymen traditionellen Bauweisen fanden aber immer wieder das Interesse der Architekten und Konstrukteure im 20. Jahrhundert, die an Experimentalbauten die Formbildung und das Tragverhalten studierten und die Eignung elastischer, industrieller Werkstoffe wie faserverstärkte Kunststoffe, Holzwerkstoffe oder Metalle für elastische Stäbe erprobten. Wichtige Impulse kamen vor allem von Buckminster Fuller und Frei Otto, die nicht allein an partiellen Erkenntnissen über Struktur oder Materialverhalten interessiert waren, sondern aus einem Entwurfsansatz kamen, der ganzen Konstruktionssystemen zukunftsweisende Funktionen zuwies.

Anm.:

Eine Sonderform bildet hier der Galgen, der seinem Ursprung nach ein Katapult aus biegsamen Stäben darstellte. Im Lexikon der Bautypen heißt es hierzu: „[...] Gerüst zum Erhängen von zum Tode Verurteilten; urspr. biegsamer Stamm, an dem die Verurteilten in die Luft geschleudert wurden.[...]“ Als Quellen wird Döplers *Theatrum penarum suppliciorum et executionum criminalium* [...] 2 Bd., Sonderhausen 1693/97 und W. Schild: *Alte Gerichtsbarkeit*, München 1980 angegeben. Vgl.: Seidl: *Lexikon der Bautypen*, 2012, S.171f

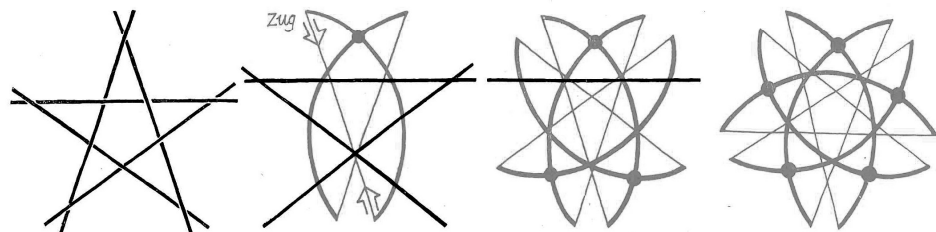
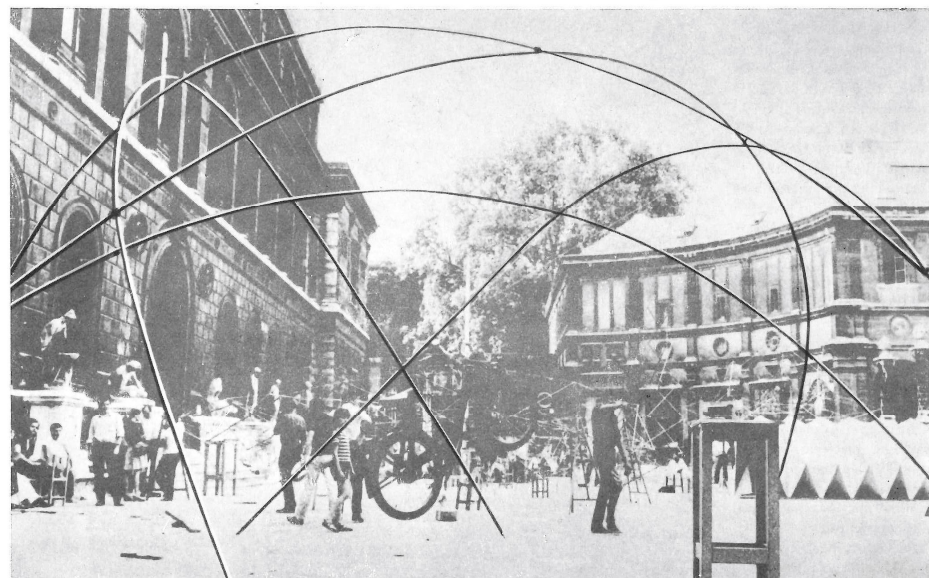


Abb. X. 8: Bildung einer Gitternetzschale aus gebogenen Stäben mit Zugbändern, Emmerich Paris 1970

¹² Siehe: Büttner/Hampe: *Tragstruktur*, Bd. 1, 1977, S. 160

¹³ Siehe: Lienhard/Alpermann et al.: *Active Bending*, 2013, S. 191

Forschung und Lehre war hierbei meistens auf das engste verknüpft und eigneten sich aufgrund der minimalen materiellen Voraussetzungen für seminaristische Veranstaltungen (Abb. X. 8) an Hochschulen, so dass diese Konstruktionsprinzipien eine gewisse Popularität erreichten, ohne sich danach in der berufspraktischen Anwendung bei Architekten und Ingenieuren durchsetzen zu können.

10.3 Die *Grenzhöhe* elastischer Stäbe nach Frei Otto

Frei Otto widmete den elastischen Stäben mit Schlankheiten $\lambda \gg 250$ empirische Untersuchungen zur Bestimmung ihrer *Grenzhöhe*¹⁴. Die Grenzhöhe eines eingespannten Stäbchens kann experimentell bestimmt werden, indem ein gerader Stab kontinuierlich durch ein passendes Bohrloch vertikal durchgeschoben wird. Nach anfänglich gerader Verlängerung in Richtung der y-Achse, stellt sich ab einer bestimmten Länge eine Biegefigur ein (Abb. X. 9), die schließlich den Stab in eine abwärts gerichtete Bogenform krümmt. Der höchste Punkt, den das Stabende erreicht, ist seine *Grenzhöhe*. Sie ist abhängig von der Querschnittsform und dem Werkstoff.

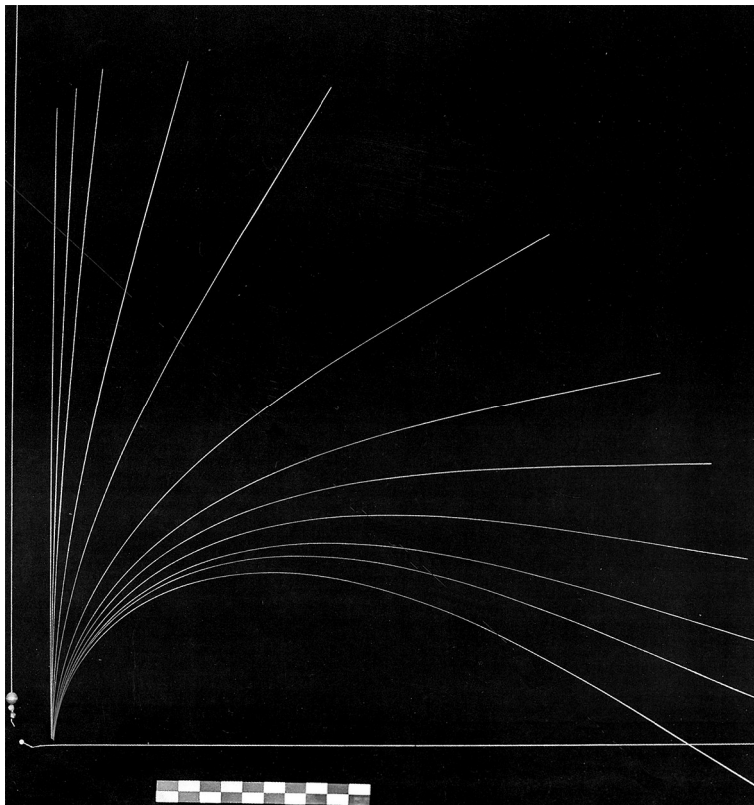


Abb. X. 9: Bestimmung der Grenzhöhe von Federstahldraht, Frei Otto

¹⁴ Siehe: Otto: IL 24 Prinzip Leichtbau, 1997, S. 125

Frei Otto erkannte hierin einen Selbstbildungsprozess, den er wie folgend erklärte:

„Biegebeanspruchung als formbestimmender Faktor in einem Selbstbildungsprozeß setzt in der Regel ein in einem vorhergegangenen Entstehungsprozeß erzeugtes Objekt voraus. Die Verformung eines Objektes unter Biegebeanspruchung führt zum Ausweichen vor den wirkenden Kräften. Die aus der Beanspruchung resultierende Kombination von Zug- und Druckkräften im Innern hat vor allem auf schlanke Objekte formbestimmenden Einfluß.“¹⁵

Für den in Abb. X. 9 untersuchten Federstahldraht wird eine Traglastterhöhung durch den Selbstbildungsprozess gegenüber dem unverformten senkrechten Stab von 110 % gemessen.¹⁶

Der Selbstbildungsprozess gründet aber in diesem Fall ausschließlich auf dem Eigengewicht des Stabes und lässt keine signifikanten äußeren Lasten zu; das System befindet sich in einem fragilen Gleichgewicht.

10.3.1 Mögliche Anwendungsfelder extrem schlanker Stäbe

Die in der vernakulären Architektur beobachtete intuitive Verwendung von elastischen, schlanken Stäben zu Bauzwecken wurde häufig dem Prinzip und der Funktion nach für Demonstratoren kopiert, um Formbildungsprinzipien, Tragverhalten oder die Materialsubstitution zu erforschen. Demgegenüber sind Aussagen zu unerschlossenen Anwendungsgebieten für diese Bauart deutlich seltener zu finden.

Der Autor sieht aber im *IL 20 Aufgaben*¹⁷ in den Kapiteln *wandelbare Tragwerke*, *Druckglieder & Unterstützungen* und *Vorspannung* Anwendungsfelder adressiert, die von dem Prinzip extrem schlanker Stäbe unterhalb der Grenzhöhe profitieren können:

- a) *Wandelbare Tragwerke - bewegliche Skelettstrukturen*¹⁸:
Als Anwendungsbeispiel werden wandelbare Dächer und Kräne genannt, die als Skelettkonstruktionen aus leichten, druckbeanspruchten Elementen und Zugelementen zu deren Steuerung bestehen.
Dieser Ansatz trennt zunächst noch die steifen Druckglieder von den Zuggliedern. Es wird an dieser Stelle vermutet, dass der Selbstbildungsprozess schlanker Stäbe durch Seilverspannungen steuerbar ist.
- b) *Druckglieder & Unterstützungen - Leichtbaumaste*¹⁹:
Als Anwendungsbeispiele werden leichte Maste für stationäre oder wandelbare Membran- und Netzkonstruktionen genannt,

¹⁵ Otto: IL 25 Experimente, 1990, S. 2.16

¹⁶ Siehe: Otto: IL 25 Experimente, 1990, S. 5.20

¹⁷ Otto: IL 20 Aufgaben, 1979

¹⁸ Siehe: Otto: IL 20 Aufgaben, 1979, S. 49

¹⁹ Siehe: Otto: IL 20 Aufgaben, 1979, S. 50

die auch zur Vorspannung der Membranen oder Netze herangezogen werden können.

Es ist zu prüfen, inwieweit das elastische Verhalten im Selbstbildungsprozess schlanker Stäbe zur elastischen Stützung bzw. Vorspannung genutzt werden kann.

c) *Druckglieder & Unterstützungen – abgespannte Maste*²⁰:

Als Anwendungsbeispiele werden konventionelle seilverspannte Maste mit Erdankern und solche mit reziproker Rückverspannung genannt.

Ähnlich wie in b), nur dass hier keine Vorspannung anderer Konstruktionselemente notwendig ist.

d) *Vorspannung – einbringen der Vorspannung*²¹:

Hier werden als Aufgabenfeld die praktischen und theoretischen Aspekte zur Einbringung, Steuerung und Erhaltung einer Vorspannung bei zugbeanspruchten Konstruktionen wie Membran- und Seilnetzkonstruktionen benannt.

Der Punkt b) ist hiervon ein Teilaspekt; das Tragverhalten einer elastischen Unterstützung ist im Gesamtsystem einer vorgespannten Konstruktion zu bewerten.

Die Aufgabengebiete a)-d) sind von den Autoren des IL 20 1979 im Selbstverständnis verfasst wurden, dass es:

*„[...] jetzt weniger um neue Erfindungen oder um neue Methoden [geht]. Es geht um die Ausweitung und Verbesserung der vorhandenen Grundlagen.“*²²

Die Kommentare zu den ausgewählten Aufgaben scheinen den Möglichkeitsraum für Lösungen ggf. zu erweitern.

10.4 Active Bending

Mit dem beginnenden 21. Jahrhundert hat sich um Julian Lienhard, Christoph Gengnagel und Jan Knippers ein Forschungsnetzwerk in deutschsprachigen Raum gebildet, das im internationalen Forschungsfeld *Active Bending* tätig ist. Unter dem Begriff *Active Bending* versteht Christoph Gengnagel:

*„[...] is the utilisation of elastic deformation as a shaping process for straight linear elements or planar elemental surfaces, with the main motivation for its use lying in the simplicity of producing curved elements.“*²³

Dieses Forschungsfeld sieht sich in der Tradition der zuvor genannten frühen Pioniere Buckminster Fuller oder Frei Otto, die die Anwendungen von biegeweichen Stab- und Flächenelementen in der vernakulären Architektur und verwandter Disziplinen studierten, um die erkannten

²⁰ Siehe: Otto: IL 20 Aufgaben, 1979, S. 51

²¹ Siehe: Otto: IL 20 Aufgaben, 1979, S. 90

²² Otto: IL 20 Aufgaben, 1979, S. 10

²³ Gengnagel: Active Bending, 2013

Gesetzmäßigkeiten der Selbstbildungsprozesse zur gezielten Auswahl neuer Materialien nutzen zu können.

Das wieder gestiegene Interesse an diesem Forschungsfeld wird von den Autoren des *Active Bending* darin gesehen, dass sich beispielhaft in der High-Tech-Architektur in den Randbereichen der adaptiven Tragwerke neue Anwendungsfelder öffnen, die von der Verfügbarkeit neuer hochelastischer Werkstoffe und den Berechnungsmethoden der Finite-Elemente profitieren können.

Das elastische Verhalten wird hiernach durch das Verhältnis der Biegezugfestigkeit zum E-Modul eines Materials beschrieben, das einen Quotienten von größer 2,5 aufweisen sollte²⁴:

Zu Gl. X. 5:

E : E-Modul in GPa

$\sigma_{M,Rd}$: Biegezugfestigkeit in MPa

Gl. X. 5:

$$\frac{\sigma_{M,Rd}}{E} > 2,5$$

Für eine wechselnde, elastische Beanspruchung wird entgegen der Ermüdung gar ein Verhältnis von größer 10 gefordert²⁵:

Gl. X. 6:

$$\frac{\sigma_{M,Rd}}{E} > 10$$

In dieser Konsequenz eignen sich die gewöhnlichen und höherfesten Baustähle kaum, da das Verhältnis der Biegezugfestigkeit zum E-Modul ungünstig liegt. Erst ein S690 liegt mit einem Quotienten von 3,29 über dem geforderten Mindestwert. Dagegen erreicht Bambus einen Quotienten bereits von 11,13 und der von Karbonfaserwerkstoffen reicht bis zu 16,97²⁶, wobei hier die absolute Höhe der Biegezugfestigkeit mit 2800 MPa hervorzuheben ist.

So werden im themenbezogenen Aufsatz *Materials for Actively-Bent Structures*²⁷ zur Identifizierung geeigneter Materialien weitere Kennwerte und deren Verhältnisse nach der Methode Ashbys²⁸ zueinander ausgewertet. Hier sind beispielhaft zu nennen, die Zähigkeit oder die Effizienz.

Zusätzlich kann hier der Einfluss der Gestaltform durch einen Formfaktor berücksichtigt werden, der neben den reinen Materialkennwerten bei Stab-Objekten das elastische Verhalten wesentlich beeinflusst²⁹:

Zu Gl. X. 7:

I : z.B. Flächenträgheitsmoment des Kreisringquerschnitts in cm⁴

I_{ref} : Flächenträgheitsmoment des massiven Querschnitts in cm⁴

Gl. X. 7:

$$\varphi = \frac{I}{I_{ref}}$$

²⁴ Lienhard/Alpermann et al.: *Active Bending*, 2013, S. 189

²⁵ Lienhard/Alpermann et al.: *Active Bending*, 2013, S. 189

²⁶ Lienhard/Alpermann et al.: *Active Bending*, 2013, S. 189

²⁷ Kotelnikova-Weiler/Douthet et al.: *Materials for Actively-Bent Structures*, 2013

²⁸ Ashby: *Materials Selection*, 2011

²⁹ Kotelnikova-Weiler/Douthet et al.: *Materials for Actively-Bent Structures*, 2013, S. 231

Der ermittelte Formfaktor aus Gl. X.7 gestattet es, einen effektiven E-Modul bei zuvor gewähltem Querschnitt und Material zu bestimmen:³⁰

Gl. X. 8:

$$E_{ef} = \varphi E$$

Zu Gl. X. 8:

E : E-Modul

φ : Formfaktor aus Gl. X. 7

E_{ef} : effektives E-Modul

Die Autoren geben für ein Kreisrohr mit einem Verhältnis der Wandstärke zu seinem Durchmesser von $\frac{1}{10}$, eine effektive Steigerung des E-Moduls mit dem Faktor 5 an³¹.

Aus diesem Zusammenspiel der verbesserten Materialeigenschaften, der Kenntnis um die Abhängigkeiten der relevanten Kennwerte zueinander und der rechnergestützten Auswertung des lastabhängigen Verformungsverhaltens nach Theorie III. Ordnung, ist es aktuell möglich, elastische Stäbe oder ganze Gitterschalen zu konstruieren.



Abb. X. 10: *Composite Territories* in der ggggallery in Kopenhagen, 2012

Die Abb. X. 10 zeigt eine Gitterschalen-Installation³² aus Glasfaserverstärktem Kunststoff, bei der durch Graduierung der Elastizität der einzelnen Streifen eine Biegefigur kontrollierbar wurde, die im Gleichgewichtszustand mit dem Eigengewicht steht. Die Steifigkeit der Streifen konnte durch die Anzahl der unidirektionalen Glasfasern im Kompositen eingestellt werden, ohne dass die Streifendicke des Komposits variiert werden musste.

³⁰ Kotelnikova-Weiler/Douthe et al.: *Materials for Actively-Bent Structures*, 2013, S. 231

³¹ Kotelnikova-Weiler/Douthe et al.: *Materials for Actively-Bent Structures*, 2013, S. 231

³² Siehe: Nicholas/Tamke: *Computational Strategies for Bending Active Structures*, 2013, S. 219f

Abbildungsverzeichnis Kapitel 10:

- Abb. X. 1: Brücke aus Flechtstabwerk als reziprokes System, Leonardo da Vinci. Aus: Archivale Leonardo: Codex Atlanticus, S.71v, Biblioteca Ambrosia Mailand, digitale Kopie verfügbar unter: <http://www.leonardodigitale.com/> Codex Atlantico 0071v, Ausschnitt, 1478-1518
- Abb. X. 2: reziprokes Modul mit Mindestanzahl der Stabelemente. Aus: Verfasser
- Abb. X. 3: Kinderschaukel aus biegsamen Bambusrohren, IL 31. Aus: Hrsg. Otto, Frei: IL 31 Bambus Bamboo : Bambus als Baustoff : Bauen mit pflanzlichen Stäben. Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, Nr. 31, 1985, S. 9
- Abb. X. 4: links vernakuläre, biegeweichere Bambusbrücke; rechts Hängewerkbrücke mit steifen Druckstreben, IL 31. Aus: Hrsg. Otto, Frei: IL 31 Bambus Bamboo : Bambus als Baustoff : Bauen mit pflanzlichen Stäben. Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, Nr. 31, 1985, S. 29
- Abb. X. 5: Fragmente von Bogen-Wurfarmen aus Kiefernholz aus dem Stellmoor. Aus: Rust, Alfred: Die Alt- und Mittelsteinzeitlichen Funde von Stellmoor. Hrsg. Archäologisches Institut des Deutschen Reiches, Karl Wachholtz Verl., Neumünster, 1943, Tf. 98
- Abb. X. 6: Schema zur elastischen Verformung des Pfeils beim Auslösen, Archer's Paradox nach Klopsteg. Aus: Verfasser
- Abb. X. 7: Schematische Federkennlinien hier für Translationsfedern, a) degressiv, b) linear und c) progressiv. Aus: Verfasser
- Abb. X. 8: Bildung einer Gitternetzschale aus gebogenen Stäben mit Zugbändern, Emmerich Paris 1970. Aus: Büttner, Oskar und Erhard Hampe: Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur : Bd. 1. Gerd Hatje, Stuttgart, 1977, S. 219
- Abb. X. 9: Bestimmung der Grenzhöhe von Federstahldraht, Frei Otto. Aus: Hrsg. Frei Otto: IL 25 Experimente Form-Kraft-Masse 5. (Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, Nr. 25, 1990, S. 5.21
- Abb. X. 10: *Composite Territories* in der gggallery in Kopenhagen, 2012. Aus: Nicholas, Paul u. Martin Tamke: Computational Strategies for the Architectural Design of Bending Active Structures. In: International Journal of Space Structures, S. 215-228, Vol. 28, No. 3&4, 2013, S. 219

11.0 Das Explikat

Anm. zu Begriffsintension:
Auch Begriffsinhalt genannt. „[...] ist die Summe der Begriffsmerkmale, die ein Gegenstand aufweisen muss, um unter den Begriffsinhalt zu fallen“ Hügli/Lübcke: Philosophielexikon, 2003, S. 84

Dieses Kapitel schließt die Klammer, die mit dem methodischen Ansatz des Explizierens geöffnet wurde. Der Begriff *Stab* wurde als *Explikandum* in dieser Folge aus verschiedenen Richtungen betrachtet, um seine *Begriffsintension* über das gebräuchliche Maß, im Kontext des Ingenieurwesens, erfassen zu können.

Es konnte in einem ersten Schritt gezeigt werden, dass die vorherrschende, gebräuchliche Begriffsintension schon ungeeignet erscheint, um die *Begriffsextension*, d.h. „die Menge der Gegenstände, die faktisch unter den Begriff fallen“, zu begrenzen. So werden darunter einerseits physische Objekte mit dominierender Dimension der Länge verstanden, ohne hier Grenzmaße zu definieren und andererseits ideelle Modellvorstellungen, bei denen die abstrakten Arten der angreifenden Kräfte nicht einheitlich beschrieben sind.

Nach der *Prototypentheorie*² entwickelte sich aus den typischen Eigenschaften anhand paradigmatischer Fälle³ eine Vorstellung des Begriffs *Stab* im konstruktiven Kontext, die zur o.g. unscharfen, aber beschränkten Begriffsintension führte. Die Beschränkung wird hier in der Ausblendung der extrem schlanken, biegeweichen Tragwerkselemente, wie z.B. dem Bambusrohr, gesehen.

Erst in der Interpretation nach dem Ansatz der *Theorie-Theorien*⁴, nach der Begriffe durch die funktionale Rolle individuiert werden, welche sie in bestimmten Theorien spielen⁵, wird eine definitorische Abgrenzung der Begriffsintension vorgenommen, die das Maß der Beschränkung nochmals erhöht – was im Wesen der Definition liegt. So ist der *Stab* bei Dankert & Dankert

„[...] in einem System starrer Körper mit genau zwei Gelenken mit den anderen Teilen des Systems verbunden. Nur über diese Gelenke werden Kräfte in den Stab geleitet.“⁶

Und der *Stab* kann gemäß dieser starken Abstraktion „[...] nur eine Kraft in Richtung der Verbindungslinie seiner beiden Gelenke übertragen [...]“⁷ Der *Stab* wird so reduziert zum eindimensionalen Objekt der geraden Linie, mit den Normalkraftzuständen Druck oder Zug. Folgt man dieser Definition des Stabes kann man ihn als Teilmenge der linienförmigen

¹ Hügli/Lübcke: Philosophielexikon, 2003, S. 84

² Siehe: online: www.iep.utm.edu/Prototype

³ Siehe: online: <https://de.wikipedia.org/Philosophie>

⁴ Siehe: online: www.iep.utm.edu/Theory-theories

⁵ Siehe: online: <https://de.wikipedia.org/Philosophie>

⁶ Dankert/Dankert: Technische Mechanik, 2013, S. 70

⁷ Dankert/Dankert: Technische Mechanik, 2013, S. 70

Tragstrukturelemente zuordnen. Andere Teilmengen wären der Biegebalken, der Torsionsstab und den Hybriden aus den drei Belastungsarten.

Der Begriff *Stab* folgt aber noch nicht dieser, der Mengenlehre entlehnen, definitorischen Abgrenzung im täglichen Gebrauch, und ist somit auf den semantischen Kontext im konstruktiven Bereich angewiesen. Der Begriff ist weder *univok* noch streng *äquivok*, da in den unterschiedlichen Kontexten zumindest eine assoziative Analogie herrscht – und dieser Begriff daher für logische Schlussfolgerungen ungeeignet ist.

Das Ziel dieser Explikation ist es, ausgehend von der Begriffsbestimmung der Menge der linienförmigen Tragstrukturelemente, ein neues, übergeordnetes Explikat zu formulieren, das auch Elemente umfasst, die nicht in der Systematik von Büttner & Hampe explizit benannt werden können (Abb. XI. 1).

Anm. zu *univok*:

Sub. *Univokität*. Wenn ein Wort in unterschiedlichen Kontexten in identischer Bedeutung Verwendung findet; es ist somit immer eindeutig. Siehe: Hügli/Lübcke: Philosophielexikon, 2003, S. 640

Anm. zu *äquivok*:

Sub. *Äquivokität*. Wenn ein Wort in unterschiedlichen Kontexten in abweichender Bedeutung Verwendung findet; es ist somit eindeutig mehrdeutig. Siehe: Hügli/Lübcke: Philosophielexikon, 2003, S. 640

		Flächenelemente				Linienelemente			
		biegesteif		biegeweich		biegesteif		biegeweich	
		Schale	Scheibe	gekrümmte Membran	ebene Membran	Bogen	Stab	gekrümmtes Seil	gerades Seil
Linienlemente	biegeweich	gerades Seil							
		gekrümmtes Seil							
	biegesteif	Stab							
		Bogen							
Flächenelemente	biegeweich	ebene Membran					Tragstrukturen aus gleichartigen Strukturelementen zusammengesetzt.		
		gekrümmte Membran							
	biegesteif	Platte					Tragstrukturen aus verschiedenartigen Strukturelementen zusammengesetzt.		
		Schale							

Abb. XI. 1: Kombinatorik von Tragstrukturelementen, Büttner & Hampe

Die Abb. XI. 1 zeigt die von Büttner & Hampe identifizierten Tragstrukturelemente, d.h. es sind Modellvorstellungen von Tragwerkselementen, deren physische Erscheinung mannigfaltig sein können.

Die von Büttner & Hampe vorgestellten Beispiele linienförmiger Tragwerkselemente, zur Analyse der gebauten Umwelt im Band 1⁸, lassen sich aber nicht alle eindeutig nach ihrer eigenen Systematik einordnen. Der elastisch verformte Stab wird anhand mehrerer Beispiele aus der vernakulären und akademischen Architektur von ihnen vorgestellt (vgl. Abb. X. 8) und entspricht nicht dem biegesteifen Bogen in

⁸ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 1, 1977

Abb. XI. 1 und zeigt auch in den vier Kriterien zur Beurteilung der Tragqualität abweichende Eigenschaften zum biegesteifen Bogen:⁹

- *Schnittkraft- und Formänderungsverhalten unter statischer Belastung*
- *Schnittkraft- und Formänderungsverhalten unter dynamischer Belastung*
- *Stabilitätsverhalten*
- *Verhalten beim Erreichen von Grenzzuständen*

Der biegeweiche Stab wird erst durch das Verankern im Boden oder durch ein Zugband in seiner Bogenform gehalten; Letzteres bei dem Kuppeltragwerk in Abb. X. 8. Der biegeweiche Stab in Bogenform mit Zugband entspricht den *Tragstrukturen der 3. Art* nach Büttner & Hampe:

„Entstanden durch Kombination zweier qualitativ unterschiedlicher Elemente oder Elementgruppen und vereinigen mindestens zwei Tragstrukturelemente unterschiedlicher Tragqualität in sich.“¹⁰

Die Kombination besteht aus den unterschiedlichen Elementen biegeweicher Stab und gerades Seil aus der Elementgruppe der linienförmigen Tragstrukturelemente.

Das Element biegeweicher Stab ergänzt sinnvoll die Elemente biegesteifer Bogen und Stab und teilt mit diesen Elementen die weitgehende Formfestigkeit in Abgrenzung zu den Seilen und Schläuchen.

9.1 Explikat *Stabförmigkeit*

Es konnte gezeigt werden, dass der *Stab* ein entwicklungsgeschichtlicher Begriff ist, der erst im Kontext der Stabtragwerkstheorie einer engen Definition unterliegt, ohne dabei die geforderte Univozität erlangen zu können.

Aus der entwicklungsgeschichtlichen Perspektive bestehen gewisse Analogien innerhalb der *Stäbe*:

- a) Formfestes Material
 - i. Schnittkräfte: Normalkraft, Querkraft, Moment und Torsion
- b) Geometrie einer Umhüllenden mit deutlich größerer Länge im Verhältnis zum Quermesser
 - i. Mit gerader Achse
 - ii. Mit gekrümmter Achse

Die morphologische Qualität der Stabform und ihrer Gestaltfestigkeit können mit der *Stabförmigkeit*, oder adjektiv *stabförmig*, zutreffend benannt werden und grenzt sich im konstruktiven Kontext gegenüber dem Stab ab. Die Überführung des *Explikandum Stab*, in das *Explikat*

⁹ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985, S. 17

¹⁰ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985, S. 12

Stabförmigkeit soll anhand der vier Forderungen zur Explikation nach Carnap überprüft werden¹¹: [sic]

„1. Das Explikat muß dem Explikandum so weit ähnlich sein, daß in den meisten Fällen, in denen bisher das Explikandum benutzt wurde, statt dessen das Explikat verwendet werden kann. Eine vollständige Ähnlichkeit wird jedoch nicht gefordert; es werden sogar beträchtliche Unterschiede zugelassen.

Die Stabförmigkeit bezeichnet danach alle linearen, gestaltfesten Tragwerkselemente und Tragstrukturelemente, die nicht identisch mit der Definition nach Dankert & Dankert zusammenfallen. Die Ähnlichkeit ist im Begriff angelegt, aber die Unterschiede in Tragqualität und Tragverhalten deutlich erkennbar.

2. Die Regeln für den Gebrauch des Explikates müssen in exakter Weise gegeben werden, so daß das Explikat in ein wohlfundiertes System wissenschaftlicher Begriffe eingebaut wird.

Es ist möglich, die Stabförmigkeit im fundierten System Büttner & Hampe komplementär zu verorten. Die Regeln für seinen Gebrauch sind im zuvor Gesagten beschrieben.

3. Das Explikat soll fruchtbar sein, d.h. die Formulierung möglichst vieler genereller Aussagen gestatten. Diese generellen Aussagen sind entweder empirische Gesetze, sofern es sich nämlich um einen nichtlogischen Begriff handelt, oder logische bzw. mathematische Lehrsätze im Falle logisch-mathematischer Begriffe.

Als stabförmige Tragwerkselemente können die biegeweichen, extrem schlanken *Stäbe* (hier im alten Sprachgebrauch des entwicklungsgeschichtlichen Begriffs) mit eingepprägter Vorverformung bezeichnet werden. Wie fruchtbar diese Konstruktionsart der historischen vernakulären Bauweise für eine zeitgemäße Bauweise mit synthetischen stabförmigen Tragwerkselementen ist, wurde bereits im Kapitel X vorgestellt.

4. Das Explikat soll so einfach als möglich sein, d.h. so einfach, als dies die wichtigeren Forderungen 1 bis 3 gestatten. Die Einfachheit ist hier in den beiden oben angegebenen Bedeutungen zu verstehen.“

Die Einfachheit ist begrifflich als Substantiv und Adjektiv gegeben und erfüllt inhaltlich die vorausgegangenen Forderungen, wie zuvor beschrieben.

Der adjektive Gebrauch *stabförmig* bietet sich in Kombination mit den physischen Tragwerkselementen und ihren modellhaften Tragstrukturelementen an, da die substantivierte Form *Stabförmigkeit* nur bedingt als Objekt bzw. Subjekt anwendbar ist.

¹¹ Siehe: Carnap: Induktive Logik, 1959, S. 15

Abbildungsverzeichnis Kapitel 11:

Abb. XI. 1: Kombinatorik von Tragstrukturelementen, Büttner & Hampe. Aus: Büttner, Oskar u. Erhard Hampe: Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur : Klassifizierung-
Tragqualität-Bauwerksbeispiele : Bd. 2. Ernst & Sohn, Stuttgart, 1985, S. 18

12.0 Synthese mit Hilfe des Explikats

Es konnte gezeigt werden, dass das Tragverhalten von stabförmigen Tragstrukturelementen für Druckkräfte nicht auf den steifen Knickstab beschränkt sein muss und daher im neuen, übergeordneten Begriff *Stabförmigkeit* bzw. *stabförmig* auch biegeeweiche Stäbe mit großer Exzentrizität eine Inklusion erfahren.

Das produktive Potential des Explikats wird im Folgenden überprüft. Es soll ein *stabförmiges* Tragstrukturelement für Druckkräfte entwickelt werden, das die folgenden Anforderungen erfüllt:

- a) Zu Grunde gelegt wird ein Profil mit einer Schlankheit $\lambda \gg 250$, um als extrem schlank zu gelten.
- b) Ein Stabilitätsversagen soll umgangen werden.
- c) Kleine Kräfte sollen über große Distanzen übertragen werden.
- d) Das Tragstrukturelement wird mit geringem Materialeinsatz realisiert.
- e) Das Tragstrukturelement und seine Teilelemente sind aus günstigen Halbzeugen zu bilden.

Freiheiten bestehen in folgenden Aspekten:

- i) Es sind große Verformungen des Tragstrukturelementes zulässig.
- ii) Das Tragstrukturelement kann ein Hybrid aus mehreren Elementen sein.

12.1 Herleitung eines generischen Modells

Aus der Kenntnis der vorgestellten Tragqualitäten aus dem komplementären Bereich der Stäbe bzw. der Stabfedern, kann ein generisches Modell eines stabförmigen Tragstrukturelementes entwickelt werden.

Die Anwendung von extrem schlanken, biegeweichen Stäben mit eingprägter Vorverformung ist aus den bogenförmigen Tragwerken bekannt, wie sie in Abb. X. 3 und 8 exemplarisch vorgestellt wurden. Sie sind heute z.B. fester Bestandteil im Kleinzeltbau für sogenannte Tunnel- oder Iglu-Zelte. Die unter Spannung stehende Bogenform wird hier zur Formgebung der Zeltmembran herangezogen. Die Bogenform ist häufig der Parabel genähert und in den Fußpunkten durch ein Zugelement geschlossen. Der Bogen trägt über die inneren Schnittkräfte Druck und Biegemomente bzw. Querkraft die vorherrschenden Lasten aus Wind ab, wobei Schlaufen und Führungstaschen an der Zeltmembran die Krafteinleitung übernehmen und den schlanken Bogen am seitlichen Ausknicken hindern. Dagegen sind die Fuß-

punkte auf Grund der Stichhöhe des Bogens kaum in der Lage, horizontale Druckkräfte aufzunehmen, sodass Erd-Anker (Heringe) diese Kräfte abtragen müssen.

Dem gegenüber können elastische Bögen mit einem geringen Stich, wie z.B. der gespannte Pfeilbogen, sehr wohl Druckkräfte in der Wirkungslinie der Sehne aufnehmen, wenn auch das Tragverhalten als ausgeprägt federnd zu beschreiben ist.

12.1.1 Beschreibung des qualitativen Tragverhaltens

Dieses federnde Tragverhalten hat in der Modellbetrachtung von extrem schlanken Stäben den strukturellen Vorteil, dass entgegen einem geraden Eulerstab (Abb. XII. 1a Figur a)) kein spontanes, globales Stabilitätsversagen in arbiträrer Richtung mehr eintreten kann, da sich eine Biegefigur bereits eingestellt hat. In Abb. XII. 1 ist links das Tragverhalten eines Stabes nach Euler-Fall 2 dargestellt, das mit Erreichen der Verzweigungslast N_k ein spontanes Ausknicken des Stabes zur Folge hat. Unterhalb von N_k ist die Dehnung des Stabes entsprechend seiner Steifigkeit EA gering.

Ist der Stab z.B. ein kreisrundes Hohlprofil, ist die Knickrichtung in der Theorie nicht vorhersagbar wie in Figur b) der Abb. XII. 1 dargestellt. Die Figur c) der Abb. XII. 1 zeigt dagegen den elastischen Stab mit eingepprägter Vorverformung in Form des Stichmaßes a_0 .

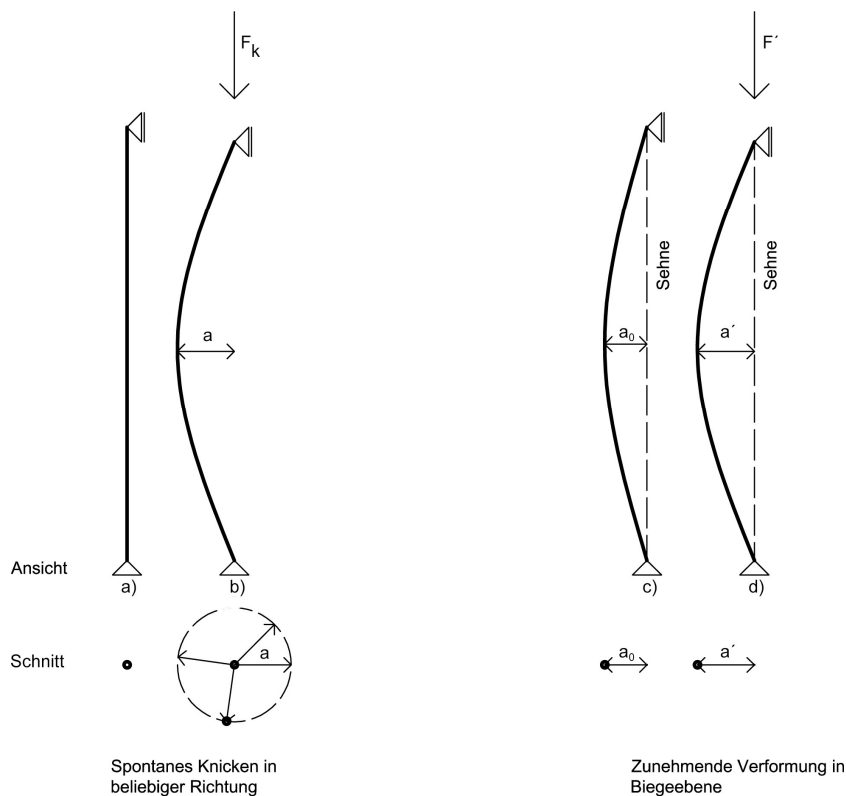
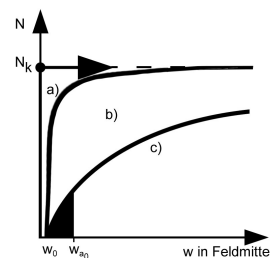


Abb. XII. 1: Unterschiedliches Tragverhalten Eulerstab a) - b) und elastischer Stab mit eingepprägter Vorverformung c) - d)

Anm.:

Das globale Stabilitätsversagen bezeichnet hier das Knicken des Stabes, demgegenüber wäre mit lokalem Stabilitätsversagen das Beulen der Zylinderschale des Hohlprofiles gemeint.



a) schlagartige Verformungen im Modell nach Euler
b) reale, gerade Stäbe mit geringem w_0
c) elastisch vorgekrümmter, schlanker Stab mit großem w_0

Abb. XII. 1a: Stabilitätsverhalten von Stäben im Modell und Realität

Die eingeprägte Vorverformung wird durch das Zugelement *Sehne* gehalten, sodass das System nach außen kräftefrei bleibt. Wird nun dieses vorverformte System durch eine äußere Last $F' < N_k$ belastet, bleibt die Figur in ihrer Biegeebene, der Stich a' stellt sich ein und die Sehne erschlafft.

Besteht der Stab z.B. aus einem duktilen Metallwerkstoff, wird in einer ersten Phase das Biegeverhalten als elastisch und mit fortschreitender Beanspruchung in einer zweiten Phase als plastisch beobachtet (Abb. XII. 2). Es ist daher die Gesamtverformung des gebogenen Stabes, bestehend aus den Anteilen a_0 für die Vorkrümmung und dem Anteil aus der Nutzlast F' auf den elastischen Bereich zu begrenzen, damit ein Fortschreiten des Ausbiegens wie bei Überschreiten von N_k unterbleibt.

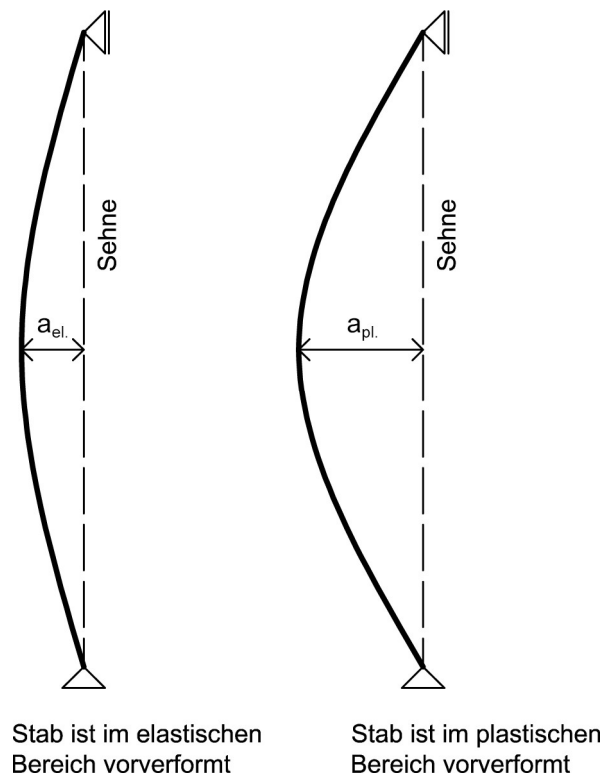


Abb. XII. 2: Grad der Vorverformung beim biegeweichen Stab

Es ist die Größe von a_0 zu identifizieren, die eine effektive minimale Vorkrümmung gestattet, die einerseits eine Betrachtung als Eulerstabmodell unterhalb von N_k ausschließt und andererseits verbleibende, elastische Reserven im Stab erhält, um auf äußere Druckkräfte ohne bleibende Verformungen reagieren zu können. Die Differenz aus gesamtelastischen Bereich $a_{el.}$ und a_0 ergibt den sogenannten *Arbeitsbereich* des Stiches, siehe Abb. XII. 3.

Wurde bisher die Zunahme des Stiches a beim Anlegen einer äußeren Last betrachtet, so kann in Abb. XII. 3 eine Kopfverschiebung den Zustandsphasen des Stiches zugeordnet werden. Hier ist der Arbeitsbereich mit Δ_1 für die Kopfverschiebung gekennzeichnet.

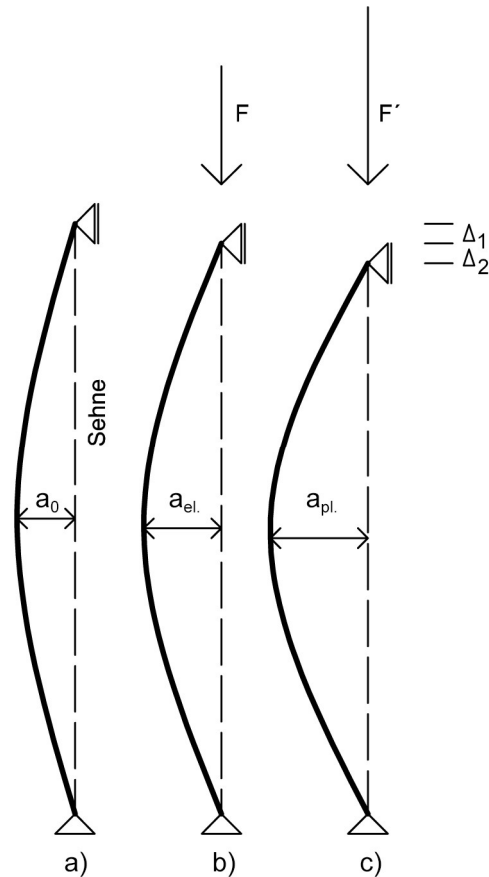


Abb. XII. 3: Definition des Arbeitsbereichs als Anteil der elastischen Verformung

Der stabförmige Hybrid kann als vorgespannte Translationsfeder aufgefasst werden, deren Wirkungsline mit der Lage der Sehne identisch ist. Es handelt sich hierbei nicht um eine lineare Translationsfeder, deren Last-Verformungs-Verhalten im Arbeitsbereich nach Hooke (vgl. Gl. X. 3) beschrieben werden kann. Abweichend von konventionellen Stäben in Stabtragwerken mit hoher Dehnsteifigkeit bei geringer Schlankheit sind aufgrund der sinus-förmigen Biegefigur merkliche Kopfverschiebungen bei Lastwechseln/-Änderungen zu erwarten.

12.1.2 Größe und Art der eingprägten Vorverformung

Die Forderung der effektiven minimalen Vorkrümmung soll analog anhand der Werte für die üblichen Durchbiegungen von Einfeldträgern nach dem Gesichtspunkt der Gebrauchstauglichkeit für einen Stab von 200 cm Länge verdeutlicht werden:

$$\text{Gl. XII. 1} \quad \frac{l}{150} \rightarrow \frac{200\text{cm}}{150} = 1,3\text{cm}$$

$$\text{Gl. XII. 2} \quad \frac{l}{200} \rightarrow \frac{200\text{cm}}{200} = 1,0\text{cm}$$

$$\text{Gl. XII. 3} \quad \frac{l}{300} \rightarrow \frac{200\text{cm}}{300} = 0,67\text{cm}$$

$$\text{Gl. XII. 4} \quad a_0 = 5,0\text{cm} \rightarrow \frac{200\text{cm}}{5,0\text{cm}} = 40 \rightarrow \frac{l}{40}$$

Gewählt wurde ein Stich von $a_0 = 5,0$ cm, was verallgemeinert mit $l/40$ ausgedrückt werden kann. Dieser Stich ist als Ergebnis der Vorspannung deutlich wahrnehmbar (Abb. XII. 1a Figur c)). Die konstruktive Detaillösung für die physische Sehne mit notwendigem Spannschloss und Verbindungsmitteln ist bei gegebenem Gesamtproportionen mit $\lambda \gg 250$ und $l/40$ realisierbar.

Die gewählte Vorverformung kann durch verschiedene Kraftzustände in das Ein-Stab-System eingeprägt werden. Neben der kontrollierten überkritischen Druckbeanspruchung entlang der Längsachse des geraden Ausgangsstabes, stehen beispielhaft Lastverformungsverfahren für Biegebalken zur Auswahl, wie sie in der Abb. XII. 4 schematisch dargestellt sind.

Anm.:

Dieser Ansatz entspricht der retrospektiven Bestimmung des *Spine-Wertes* wie in den Anmerkungen zu Abb. X. 6, als ältesten Dreipunkt-Biege-Versuch unter normierten Bedingungen.

Tatsächlich ist die genaue Form der Biegelinie zu differenzieren:

für Punktlast ergibt sich eine Parabel dritten Grades,

für die Gleichstreckenlast eine Parabel vierten Grades,

für die Momentbelastung eine Quadratparabel,

für die Druckbeanspruchung eine Sinuskurve. (s. Abb. XII. 7)

Die Biegelinien sind in Abb. XII. 4 aus Darstellungsgründen schematisch vereinheitlicht.

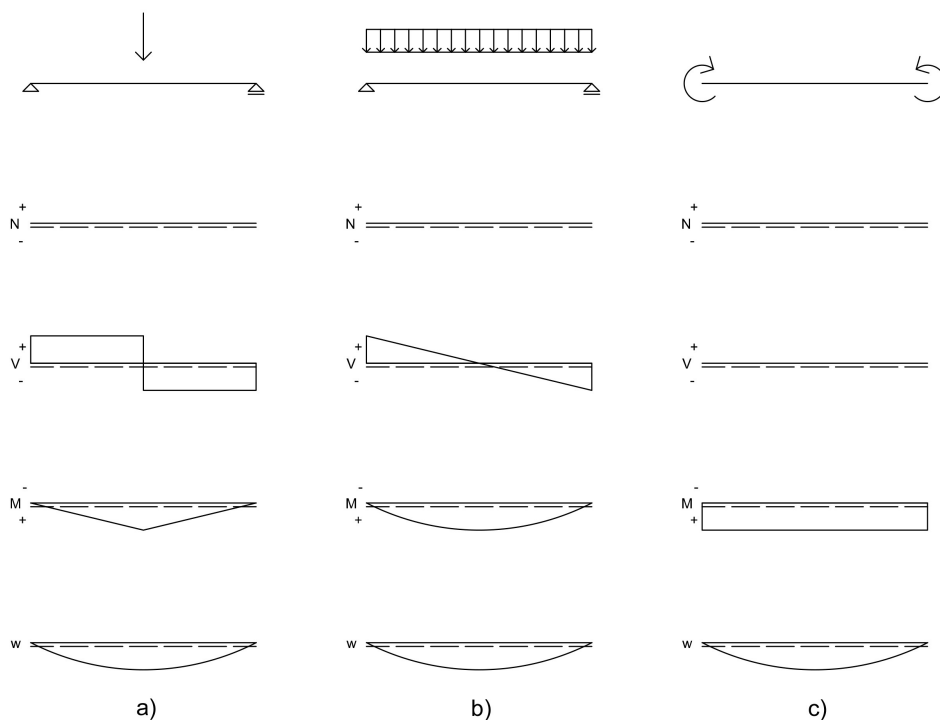


Abb. XII. 4: Lastabhängige Verformungen am Biegebalken

Für die praktische Anwendung empfehlen sich die beiden Ansätze a) und b) der Abb. XII. 4, da durch einfaches Anlegen einer Punkt- oder Gleichstreckenlast eine kontrollierte Biegelinie mit $a_{max.} \sim a_0$ herbeigeführt werden kann (siehe Anm. Abb. XII. 4).

Über die analytischen Formeln für das Maß der Durchbiegung zur Länge, kann a_0 in Abhängigkeit zur Last genähert werden:

$$\text{Gl. XII. 5} \qquad \text{Punktlast mittig:} \qquad a_0 = \frac{F \cdot l^3}{48 \cdot EI}$$

$$\rightarrow F = \frac{a_0 \cdot 48 \cdot EI}{l^3}$$

$$\text{Gl. XII. 6} \qquad \text{Gleichstreckenlast:} \qquad a_0 = \frac{5 \cdot q \cdot l^4}{384 \cdot EI}$$

$$\rightarrow q = \frac{a_0 \cdot 384 \cdot EI}{5 \cdot q \cdot l^4}$$

12.1.3 Beschreibung des Verformungsverhaltens

Da die gewünschte Durchbiegung bereits eine Relativ-Verformung darstellt, soll in einem Näherungsmodell überprüft werden, wie groß die Kopfverschiebungen Δ_n für einen angenommenen Bereich a_0 bis a_{28} sind.

Der Hybrid besteht danach aus einem Stab mit eingepprägter Vorkrümmung im elastischen Bereich. Die Vorkrümmung wird durch die Sehne fixiert, so dass das System nach außen kräftefrei ist; die Biegelinie stellt sich nach Euler als Sinus-Kurve ein. Die Zughaltekraft der Sehne kann dabei durch eine gleichgroße Druckkraft von außen auf das System bei fehlender Sehne in der Theorie substituiert werden.

Vereinfachend wird hierzu die sinusförmige Biegelinie eines geknickten Stabes als Kreisbogensegment mit konstanter Länge angesetzt. Der Stab wird mit einer Länge $l_{const.} = 200cm$ in Abb. XII. 5 festgelegt.

Zu Abb. XII. 5:

Es ist zu beachten, dass die gewählte Bogenlänge auch im stark gekrümmten Zustand größer als der halbe Umfang des zugehörigen Krümmungskreises ist, damit die gesuchte Sehne nicht über den Durchmesser wandert.

M: Kreismittelpunkt
r: Kreisradius
s: Bogensehne
a: Stich
l: Bogenlänge
 α : Mittelpunktswinkel

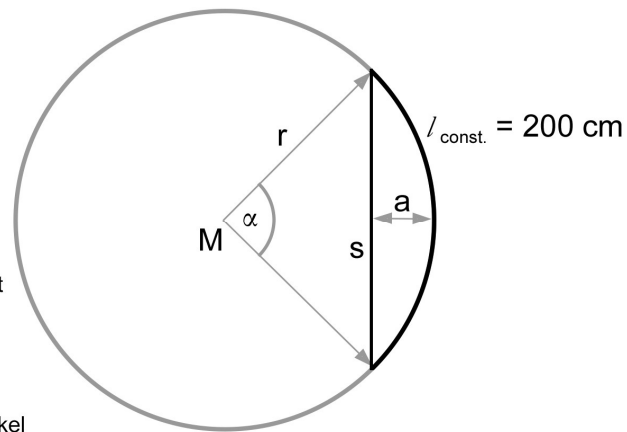


Abb. XII. 5: Näherungsmodell zur Beurteilung der Kopfverschiebung bzw. Sehnenverkürzung bei konstanter Stablänge

Es kann für das Kreisbogenssegment $l_{const.} = 200 \text{ cm}$ eine geometrische Abhängigkeit über den Kreisradius r , den Mittelpunktswinkel α , der Sehne s und dem Stich a approximiert werden:

Zu Gl. XII. 7 bis 9
mit Bezug zur Abb. XII. 5:

r : Kreisradius in cm

l : Bogenlänge in cm

α : Mittelpunktswinkel: hier im Bogenmaß rad

s : Länge der Bogen Sehne in cm.

Die Werte lassen sich nicht über eines der üblichen Lösungsverfahren, wie z.B. dem Einsetzen, Gleichsetzen etc. berechnen. Hierzu wurde auf die online-software *Rechner für Sehnen und Segmente* von Arndt Brünner zurückgegriffen, die eine Approximation der Werte ermöglicht.

Verfügbar unter: Software: arndt-bruenner/kreis-sehne

Gl. XII. 7

$$r = \frac{l}{\alpha}$$

Gl. XII. 8

$$s = 2r \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right)$$

Gl. XII. 9

$$a = \frac{(2r - \sqrt{4r^2 - s^2})}{2}$$

Entspricht a hier einem $a_0 = 5 \text{ cm}$, so ist die berechnete Sehne s mit $s_0 = 199,666 \text{ cm}$ gegenüber der Bogenlänge $l_{const.} = 200 \text{ cm}$ geringfügig kürzer; jede folgende Variation von a oder s führt zu einem neuen Krümmungskreisradius, auf dem die konstante Bogenlänge zum Liegen kommt.

Bei einem unbegrenzt ideal elastischen Verhalten des Stabes und einer unendlich großen Dehnsteifigkeit von Stab und Sehne bildet der Graph in Abb. XII. 6 die abnehmende Sehnenlänge s bei wachsendem Stich a der Figur aus Abb. XII. 5 anhand von 47 Krümmungskreisen diskret ab, der tendenziell für n -verschiedene Kreisradien steht.

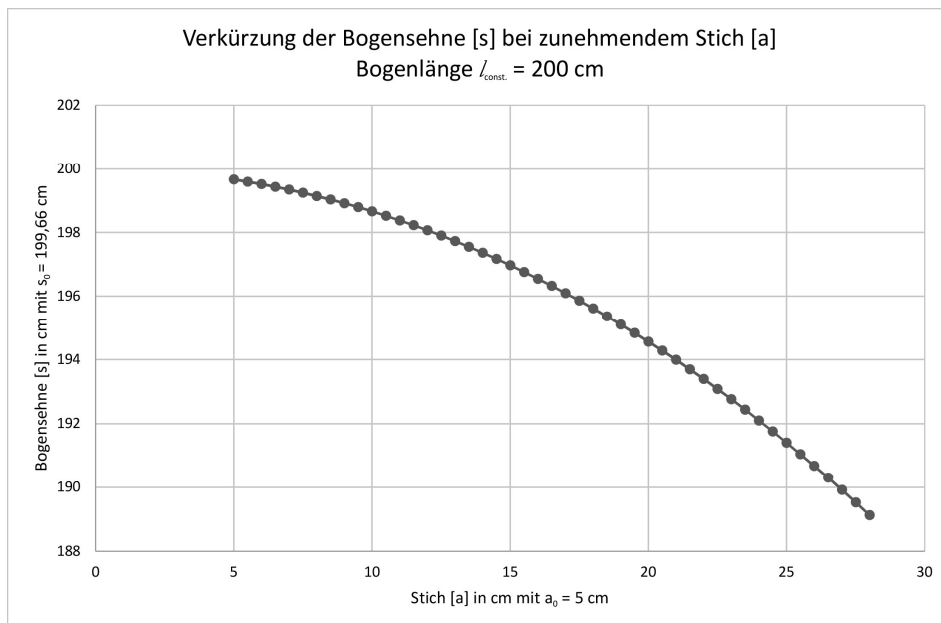


Abb. XII. 6: Approximation der Kopfverschiebung bzw. Verkürzung der Sehne mit Krümmungskreisen

Die Sehne s hat danach ihre Ausgangslänge $s_0 = 199,666 \text{ cm}$ bei einem $a_0 = 5,0 \text{ cm}$ des Ausgangskreises nichtlinear degressiv um $10,533 \text{ cm}$ bei Erreichen von $a = 28,0 \text{ cm}$ des letzten Kreises verkürzt, was gleichzusetzen ist mit einer Kopfverschiebung Δ_{47} um den gleichen Betrag von $10,533 \text{ cm}$.

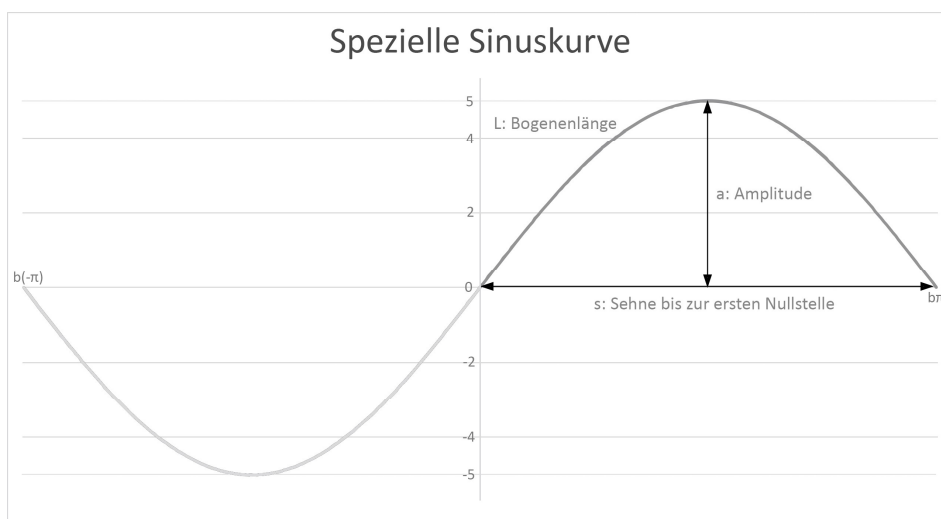


Abb. XII. 7: Spezielle Sinuskurve nach Vorgabe des gekrümmten Stabes

Die exakte Biegelinie für jeden Gleichgewichtszustand ist aber eine Sinus-Kurve (Abb. XII. 7). Jeder Gleichgewichtszustand kann somit nur von einer Sinus-Kurve innerhalb einer Sinus-Kurven-Schar erfasst werden, deren Stich-Sehnen-Verhältnisse bei konstanter Bogenlänge sich aber deutlich komplexer gestalten und tendenziell stärker degressiv ausfallen als in der Kreissegment-Näherung ermittelt.

Beispielhaft soll hier die Approximation für die zutreffende Sinuskurve erfolgen, die durch die Vorgaben $l_{const.} = 200\text{cm}$ und $a_0 = 5,0\text{ cm}$ zu keiner direkten Lösung für den Funktionsterm führt. Für die unbekannte Sehnenlänge kann nur gelten: $s_0 <_{\text{geringfügig}} 200\text{ cm}$.

Allgemeine Form der Sinuskurve:

$$\text{Gl. XII. 10} \quad f(x) = a \cdot \sin(b(x - c)) + d$$

Spezielle Form der Sinuskurve gemäß Abb. XII. 7:

$$\text{Gl. XII. 11} \quad f(x) = 5 \cdot \sin(b \cdot x)$$

Die Variable b kann nicht direkt bestimmt werden, da die Sehnenlänge bis zur ersten Nullstelle nur indirekt über die Integralfunktion der Bogenlänge approximiert werden kann. In einem iterativen Verfahren kann man einen Ausgangs-Näherungswert bestimmen, indem eine Sehnenlänge knapp unterhalb des Betrages von 200 angesetzt wird, im Bewusstsein, dass die zugehörige Bogenlänge geringfügig länger ausfallen muss.

Bestimmung des Ausgangs-Näherungswertes für b aus der Laufweite der halben Periode s :

$$\text{Gl. XII. 12} \quad b \text{ für } s = 199,8\text{cm} \Rightarrow b = \frac{\pi}{199,8} = 0,0157237$$

Einsetzen in die spezielle Form der Sinus-Funktion:

$$\text{Gl. XII. 13} \quad f(x) = 5 \cdot \sin(0,0157237 \cdot x)$$

Allgemeine Form des Integrals zur Bestimmung der Kurvenlänge:

$$\text{Gl. XII. 14} \quad L = \int_0^s \sqrt{1 + (f(x)')^2} dx$$

Integral für die spezielle Sinuskurve in den Grenzen von 0 bis s :

$$\text{Gl. XII. 15} \quad L = \int_0^s \sqrt{1 + \left(\frac{a\pi}{s}\right)^2 \cdot \cos^2\left(\frac{\pi x}{s}\right)} dx$$

$$\text{Gl. XII. 16} \quad L = \int_0^{199,8} \sqrt{1 + 0,0061809 \cdot \cos^2(0,0157237 \cdot x)} dx$$

$$\text{Gl. XII. 17} \quad L = 200,309 > s = 199,8$$

In dieser Konsequenz ist die geschätzte Sehne mit 199,8 cm korrekterweise geringfügig kürzer als die daraus berechnete Bogenlänge von 200,309 cm Länge. In dieser Rückwärtsbetrachtung kommt die errechnete Bogenlänge der Ziel-Bogenlänge von 200 cm nahe.

Dieser iterative Prozess kann mit Approximationsmethoden des wissenschaftlichen Rechnens auf die gewünschte Genauigkeit gesteigert werden. Die vorliegende Approximation erfordert schon sieben Nachkommastellen für b bzw. $\left(\frac{a\pi}{s}\right)^2$, um eine Abweichung von einer konstanten Bogenlänge von 200 cm auf ca. 0,15% beschränken zu können.

12.1.4 Beschreibung des quantitativen Tragverhaltens

Wird ein Stab mit Imperfektion bis zur Knicklast beansprucht, führt dies nach der Theorie II. Ordnung zu unendlich großen Verformungen, da die wachsende Exzentrizität die Beanspruchung durch Spannungsanteile aus dem Moment erhöht (s. Abb. XII. 1a u. Abb. XII. 8 unterer Ast).

Kindmann führt dazu ergänzend aus, dass eine geometrisch nichtlinearisierte Betrachtung nach der Elastizitätstheorie¹ zu einer differenten Biegefigur *oberhalb* [!] von P_k führt (Abb. XII. 8 oberer Ast):

„[...] P [kann] über P_{K_0} hinaus vergrößert werden, weil die extrem großen Verformungen den Normalkraftverlauf wegen

Gl. XII. 18

$$N = P \cdot \cos\varphi$$

signifikant verändern.“²

Danach stellen sich bei großen Verformungen auch entlastende Zugnormalkräfte ein, die stabilisierend wirken.³

Ausgangspunkt ist auch bei Kindmann ein Stab mit einer Imperfektion a_0 , die aber hier den Annahmen aus der Fließzonentheorie entspricht und deutlich unterhalb des $l/40 \approx a_0$ aus Kapitel 12.1.2 liegt. Zwischen den Stichen $l/40 \approx a_0$ und $l/6,674 \approx a$ wird P_k in einer genäher-ten Geraden überschritten, die mit stetig zunehmender Steigung bei $P/P_k \cong 1,75$ ihr Maximum erreicht, bevor sie rückläufig wird.

Anm.:

Die exakte Auswertung der Sinus-Kurven-Schar bezüglich der Kopfverschiebung konnte nicht analog zu Abb. XII. 6 im Rahmen dieser Arbeit geleistet werden. Grundsätzlich ist die Übereinstimmung der Graphen mit größer werdendem Stich abnehmend; die Sinus-Funktionswerte fallen steiler aus.

Anm. zu Gl. XII. 18:

Die Schreibweise der Knicklast ist in dieser Arbeit mit P_k bezeichnet und ist synonym in der Literatur unter P_{K_0} bzw. N_k auch zu finden.

¹ Siehe: Kindmann: Stabilität und Theorie II. Ordnung, 2008, S. 38

² Kindmann: Stabilität und Theorie II. Ordnung, 2008, S. 39

³ Siehe: Kindmann: Stabilität und Theorie II. Ordnung, 2008, S. 39

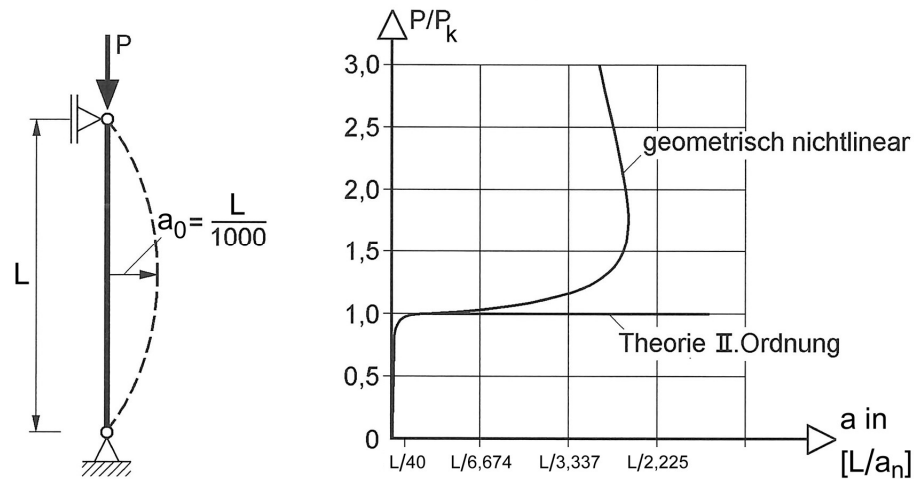


Abb. XII. 8: Lastabhängige Verformung des Stabes in der nichtlinearen geometrischen Betrachtung nach Kindmann

Das von Kindmann publizierte Zahlenbeispiel belegt – hier in einer verallgemeinerten Form vorgestellt – die Berechenbarkeit mit EDV-Programmen. Es ist aber zu diskutieren, ob hiermit das Trag- und Verformungsverhalten für ein weggeregelteres Modell, das dem vorgespannten Hybriden entspricht, zutreffend beschrieben wird, da die zutreffende Lösung über eine Differenzialgleichung nicht trivial ist.

12.2 Simulation eines spezifischen Modells

Auf Grundlage der zuvor genannten Kriterien a) bis e) an das zu entwickelnde Tragstrukturelement wird folgendes Modell eines Tragstrukturelementes gewählt, um weiterführende Aussagen zum Tragverhalten aus einer Simulation nach der Methode der Finiten Elemente ableiten zu können. Diese gewonnenen Aussagen dienen dazu, Kennwerte wie z.B. das Eigengewicht zur Sehnenkraft/Traglast ermitteln zu können.

Zur Grundlage wird ein kleinmaßstäbliches, kreisrundes Hohlprofil genommen, das auf Grund seines Trägheitsradius bei Vorgabe der Länge von 200 cm ein λ von ca. 500 erreicht und im Materialverhalten elastisch bis plastisch reagiert.

Gewähltes Hohlprofil mit der Kurzbezeichnung T05:

Präzisionsstahlrohr: $\varnothing = 1,2 \text{ cm}$; $t = 0,05 \text{ cm}$

DIN EN 10315-1, E235, +N, Bruchdehnung:

25%

$$E = 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

$$E235 \text{ mit nominell } R_m = 34 - 48 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2}$$

Gl. XII. 19

$$I = \frac{\pi}{64} (D^4 - d^4) = 0,0299 \text{ cm}^4$$

Gl. XII. 20

$$W = \frac{\pi}{32} \cdot \frac{(D^4 - d^4)}{D} = 0,0498 \text{ cm}^3$$

Gl. XII. 21

$$A = \frac{\pi}{4} (D^2 - d^2) = 0,1806 \text{ cm}^2$$

Gl. XII. 22

$$i = \sqrt{\frac{I}{A}} = 0,4068 \text{ cm}$$

Mit der Methode der Finiten Elemente kann das Verhalten für diskrete Zustände simuliert werden. Zunächst wurde ein einfaches, bilineares Materialmodell zur Verfügung gestellt⁴, das die Zugfestigkeit, $R_m = 41 \text{ kN/cm}^2$ gemittelt ansetzt. Für 40 Datenpunktpaare (Abb. XII. 9) wurde in einem weggesteuerten Prozess Stichhöhen a_n in 0,5 cm-Schritten simuliert und die Größe »Kraft« bei Erreichen des Stiches a_n erhoben. Nach Erreichen jedes Stiches a_n wurde das System wieder entlastet und die verbleibende Rückstellkraft des Systems bei Erreichen des Stiches $a_0 = 5 \text{ cm}$ ermittelt. Ein *Konnektor* im Finite-Elemente-Modell stellte sicher, dass keine Zugkräfte beim Entlastungsvorgang auf das System einwirken können.

Zu 4:

Die Modellierung und Auslese der Daten erfolgte freundlicherweise durch M.sc. Hendrik Jahns vom Institut für Stahlbau der TU Braunschweig.

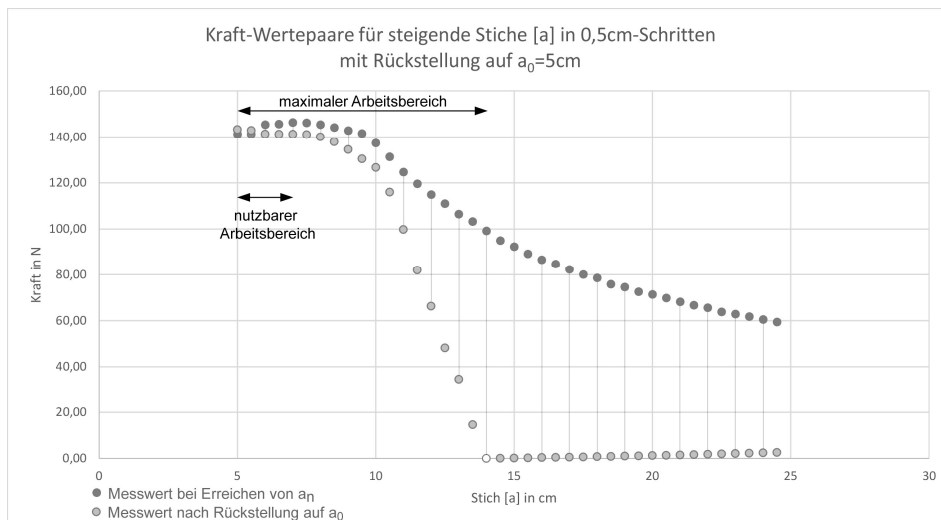


Abb. XII. 9: Simulation der Zugkraft in der Sehne bei unterschiedlichen Stichen a

Allein der elastische Anteil des stabförmigen Elementes ist somit wirksam, um ggf. den Ausgangsstich mit einer zugeordneten Kraft wieder erreichen zu können.

Im Graphen (Abb. XII. 9) kann man erkennen, dass mit dem Stich $a = 14 \text{ cm}$ (weißer Punkt) die plastischen Verformungen eine

⁴ Software: Abaqus CAE 2016□T05

Größe erreicht haben, sodass der Ausgangsstich von $a = 5$ cm nicht mehr erreicht wird und die Kraft daher gleich Null ist. Bis zu diesem Wert liegt ein *maximaler Arbeitsbereich* vor. Die Simulation zeigt aber schon in den ersten Datenpunktpaaren einen geringen plastischen Anteil, der ab $a_{11} = 10$ cm stark zunimmt.

Die weggesteuerte Simulation ergibt Gleichgewichtszustände für verschiedene Stiche a_n mit zugeordneter Kraftgröße. Grundsätzlich kann für jeden Zustand über das Einschalten einer Sehne das System nach außen kräftefrei geschlossen werden. Für $a_0 = 5$ cm wurde so eine Kraft $F_{\text{Sehne},a_0} = 143,26$ N ermittelt.

Wird der stabförmige Bogen-Sehne-Hybrid von außen in der Wirkungslinie der Sehne belastet, können Kräfte aufgenommen werden, die unterhalb der Sehnenkraft liegen müssen, wenn die Verformungen begrenzt bleiben sollen.

Es kann beobachtet werden (Abb. XII. 9), dass in der Kurve zunächst ein Anstieg, $\Delta \approx 3,1$ N, der Kraft bei zunehmendem Stich bis a_5 vorliegt, sodass eine Beschränkung des Arbeitsbereiches auf a_5 sinnvoll erscheint, da so Reserven mit höherem Widerstand auf der sicheren Seite liegen. Für Ausgangsstiche von $a_0 = 5$ cm bis $a_5 = 7,5$ cm liegt ein somit *nutzbarer Arbeitsbereich* vor, der durch die elastischen Reserven ein federndes Tragverhalten aufweist.

12.3 Tastversuche Hybrid T05

Das prinzipielle Trag- und Verformungsverhalten eines stabförmigen Hybrides wurde zuvor aus theoretischen Überlegungen heraus an einem generischen Tragstruktur-Hybriden diskutiert und in ein Tragwerks-Hybrid-Modell, auf der Grundlage von Stahlpräzisionsrohren, überführt, das einer vereinfachten Simulation nach der Finiten-Elemente-Methode zugeführt wurde. Die gewonnenen Erkenntnisse beruhen aber in weiten Teilen auf Annahmen, deren Zulässigkeit gegenüber der komplexen Tragqualität des hybriden Systems schwer abzuschätzen ist. Es wurde daher ein Versuchsaufbau entwickelt, der die Beprobung von Stahlpräzisionsrohren in einem weggesteuerten Verfahren gestattet. Die Anzahl der Probekörper, ihre Dimension und die Messgenauigkeit wurden so gewählt, dass eine angemessene Aussagekraft für erste Tastversuche erreicht wird und einen ersten Vergleich mit den numerischen Simulationen gestattet.

12.3.1 Versuchsanordnung

Der Versuchsaufbau in Abb. XII. 10 zeigt den Probekörper T05_01 aus Stahlpräzisionsrohr mit der Länge 198,1 cm in seiner Ausgangslage

Anm. zu T05_01:

Die drei Probekörper wurden nach dem Ablängen auf Geradheit und sichtbare Schäden untersucht und die Beobachtungen in den Versuchsprotokollen notiert. Weitere Vorbereitungen waren das Einbringen der Löcher und das einseitige Schlitzten. Die so präparierte Probe wurde gewogen und T05_Name gekennzeichnet.

mit einem eingepprägten Stich von 5,6 cm, der durch eine Sehne aus höherfestem Stahldraht fixiert wird. Zur Krafteinleitung ist das Rohr mit senkrechten Bohrungen von 5 mm Durchmesser an seiner Mittelachse präpariert; die Rohrlänge bezieht sich somit auf die Mittelpunkte dieser beiden Bohrungen. Die Sehne *f*) ist mit einem Spannschloss *e*) gekoppelt, das es gestattet, die Sehne manuell zu verkürzen. Die Festpunkte der Sehne sind am Kopf des Rohres in *A* und in *d*), wo eine Kraftmessdose *c*) zur Ermittlung der Zugkraft zwischengeschaltet ist. Eine direkte Befestigung der Sehne am Rohr-Ende in *B* konnte nicht realisiert werden, da die Kraftmessdose aufgrund ihrer Bauart und des Eigengewichtes nicht zwischen *A* und *B* platziert werden konnte.

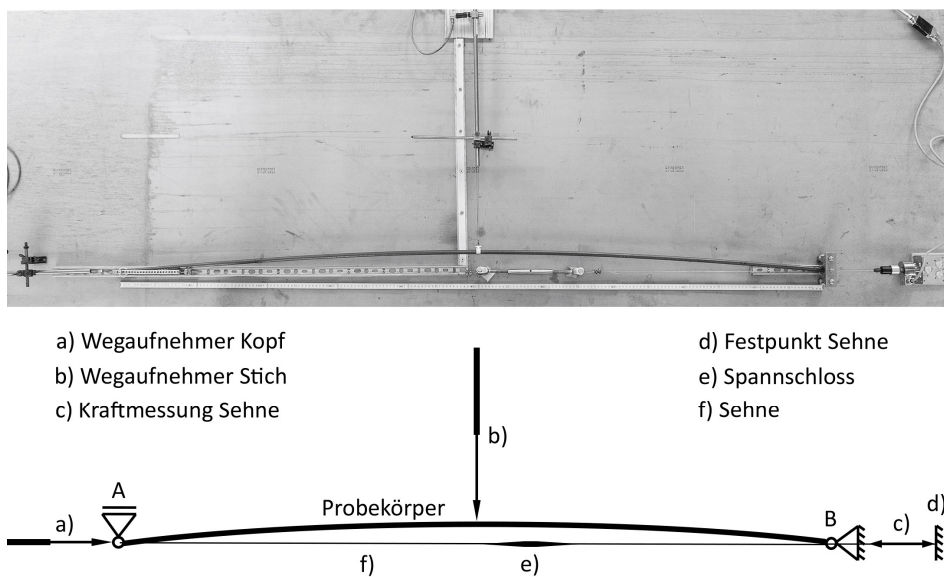


Abb. XII. 10: Foto Versuchsaufbau mit schematischer Darstellung unten

Die Trennung des Festpunktes der Sehne in *d*) und dem Festlager *B* des Rohres erforderte eine besondere Detailausbildung von *B*. In Abb. XII. 11 kann man erkennen, dass das Rohr durch zwei Gewindestangen drehbar gelagert ist und ein horizontaler Schlitz auf der inneren Seite der Rohrwand die Sehne frei durch den Verdrehungspunkt *B* der Probe passieren lässt (Abb. XII. 12). Am Kopf des Rohres in *A* ist die Sehne über einen langen Schäkel aus Windrispenband frei verdrehbar in der Bohrung befestigt. Das Lager *A* ist als schienenengeführtes Gleitlager ausgebildet, sodass sich der Kopf des Rohres nur linear, in zwei Ebenen fixiert, relativ zu *B* bewegen kann.

Anm. :

Die Sehne sollte im Verhältnis zum Hohlprofil eine gute Dehnsteifigkeit besitzen, sodass das nach außen kräftefreie System bei äußerer Belastung sofort anspricht und nicht durch eine Relaxation der Sehne träge reagiert. Eine Sehne mit dem Durchmesser 1,0 mm aus dem Werkstoff C85 mit $R_m = 223 \text{ kN/cm}^2$ erfüllt diesen Zweck, da sich die Belastungen im linearen Ast der Arbeitskurve bewegen.

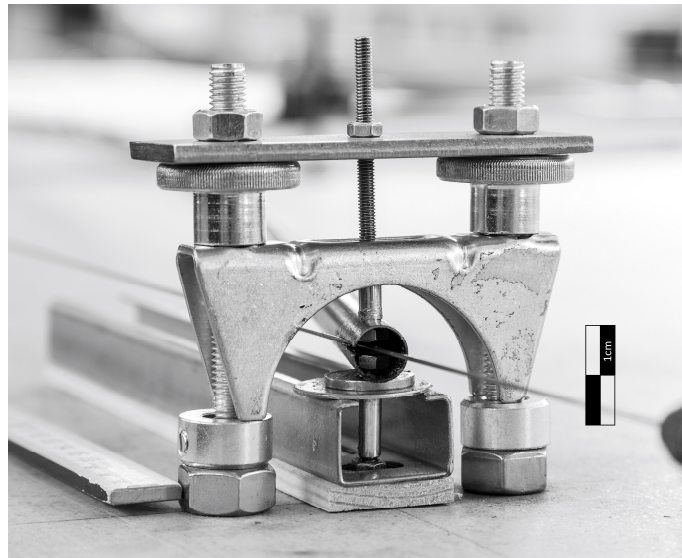


Abb. XII. 11: Verdrehbares Festlager *B* mit freier Durchführung der Sehne zur Kraftmessdose

Anm.:

Die Kraftmessdose bzw. die induktiven Wegaufnehmer wurden mit der Software DIAdem ausgelesen. Siehe: Software: DIAdem2017SP1 □ Messdaten
Auf eine rechnerische Korrektur der Wegmessung in *b)* wurde verzichtet. Der Scheitelpunkt des Bogens wandert mit zunehmender Krümmung zum Auflager *B* und erreicht mit 2,57 cm bei diesen Messungen sein Maximum. Die somit schräg gemessene Strecke weicht um ca. 0,85% von der wahren Strecke ab.

Neben der Sehnenkraftmessdose ist ein induktiver Wegaufnehmer zur Registrierung von Kopfverschiebungen *a)* und ein zweiter am Scheitelpunkt der Stichhöhe *b)* angeordnet. Eine zweite Stützschiene, im rechten Winkel zur Sehne, lagert das gekrümmte Rohr in konstanter Höhe, sodass die Schwerachse Rohr/Sehne bei jeder Biegefigur in einer Ebene zu liegen kommt.

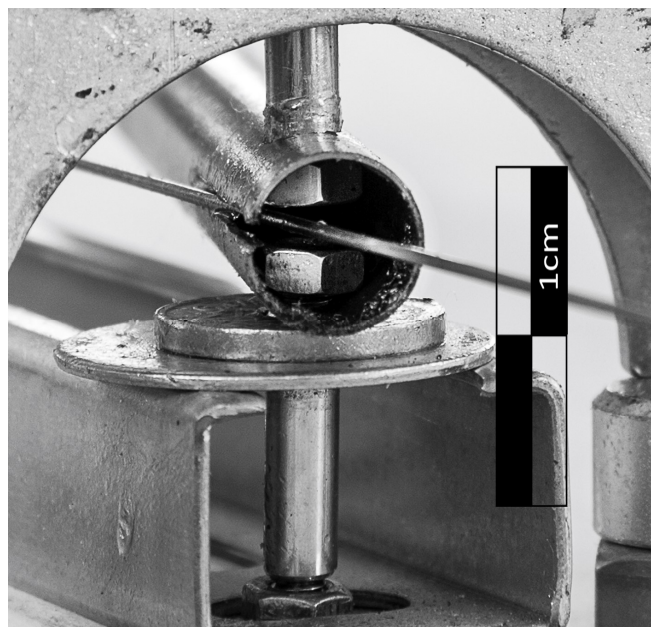


Abb. XII. 12: Detail der Drehlagerung mit freier Durchführung der Sehne

12.3.2 Versuchsdurchführung und Einordnung der Ergebnisse

In einem manuellen weggesteuerten Versuch wurde durch Spannen des Spannschlusses der Stich $a_0 = 5,6$ cm bei drei Probekörpern eingeprägt. Die Wegaufnehmer *a)* und *b)* wurden für diesen Zustand genullt und

die Sehenkraft in *d*) ermittelt. In alternierenden Schritten wurde der Stich in 0,5 cm-Schritten erhöht und auf a_0 zurückgeführt; die drei Messwerte *a*), *b*) und *c*) wurden zeitgleich diskret in den Ruhephasen a_0 und a_n bestimmt.

Für einen direkten Vergleich des Punktediagramms, aus der Näherung mit Krümmungskreisberechnungen für eine konstante Bogenlänge aus Kapitel 12.1.3 (vgl. Abb. XII. 6), ist das Ergebnis für den Probekörper T05_01 in den Abb. XII. 13 in einem Diagramm gegenübergestellt.

Die gültigen Messpunkte aus den Versuchen der Abb. XII. 13-15 zeigen dabei eine hohe Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Näherung über Krümmungskreise. Sowohl die Größe der Messwerte als auch die Tendenz des Graphen zeigen eine ähnliche Korrelation für das Verhältnis Sehenlänge und Stichhöhe, die das Verformungsverhalten zutreffend charakterisieren.

Die im Versuch T05_01 gewonnenen Messwerte weisen die größte Konsistenz innerhalb einer Messreihe auf, da hier die manuelle Beprobung ohne größere Störungen erfolgen konnte. Somit wurde auf die übliche Durchschnittsbildung mit den Messdaten aus den Versuchen T05_02 und T05_03 an dieser Stelle verzichtet.

Zu Abb. XII. 13:

Die errechneten Messwerte aus der Krümmungskreis-Approximation wurden hier auf der y-Achse von 199,666 cm auf 198,0 cm verschoben.

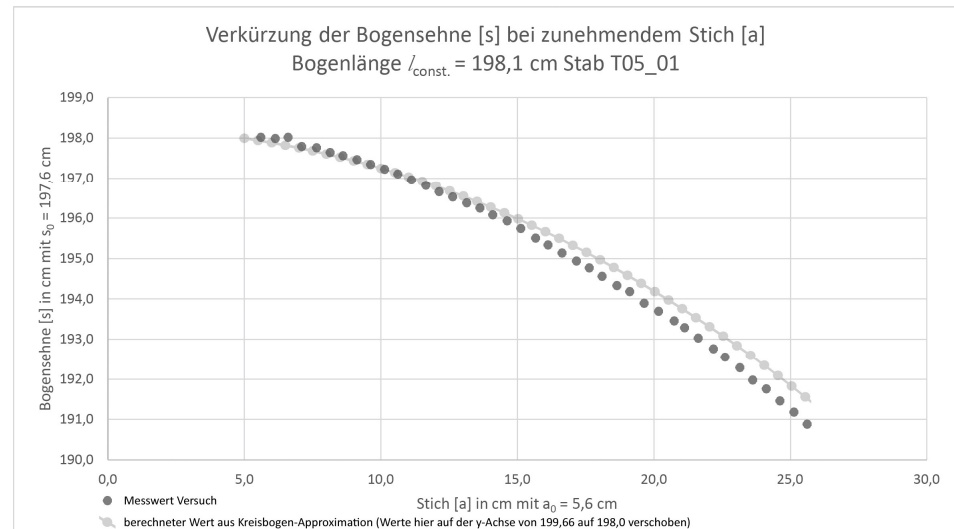


Abb. XII. 13: Abhängigkeit Sehnenlänge und Stich bei Probe T05_01 im Vergleich mit rechnerischen Werten

Zu Abb. XII. 14:

Die auffälligen Messpunkte der Abb. XII. 16 in dem Bereich um [s] 20 cm beruhen auf einer Störung im Messvorgang, da sich der Wegaufnehmer gelöst hatte und erneut am Probekörper befestigt werden musste.

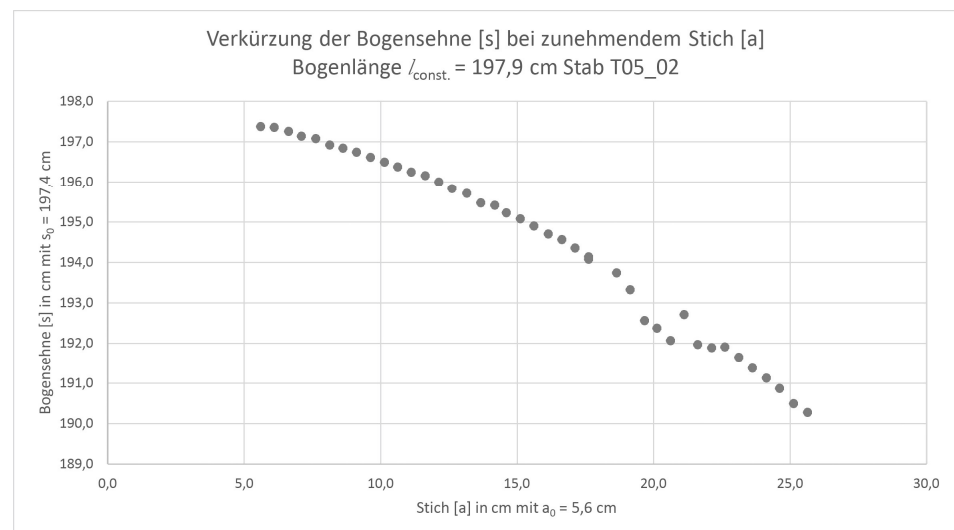


Abb. XII. 14: Abhängigkeit Sehnenlänge und Stich bei Probe T05_02

Zu Abb. XII. 15:

Die auffälligen Messpunkte der Abb. XII. 17 in dem Bereich um [s] 17 cm beruhen auf einer Störung im Verformungsvorgang, da sich das Spannschloss an der Führungsschiene verhakt hatte.

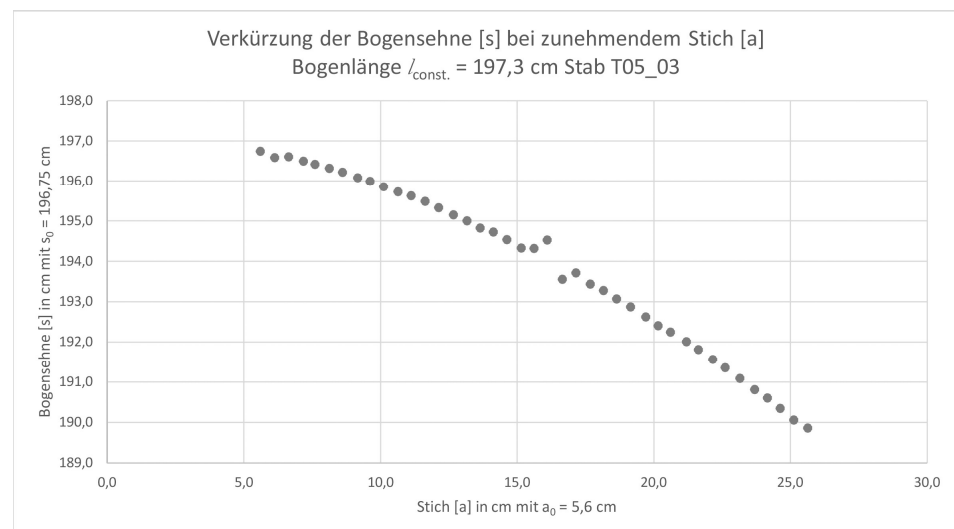


Abb. XII. 15: Abhängigkeit Sehnenlänge und Stich bei Probe T05_03

In der Abb. XII. 16 sind Messkurven des Experiments mit denen der Modellrechnung nach der Methode der Finiten-Elemente gemeinsam aufgetragen. Auch in der Auswertung der Korrelation Sehnenkraft/Stich ist der ähnliche Verlauf der Graphen von Simulation und Empirie auffällig, wobei die Messdaten gegenüber den Simulationswerten um ca. 30% höher liegen, was mit dem gemittelten $R_m = 41 \text{ kN/cm}^2$ für das einfache bilineare Materialmodell im Zusammenhang stehen könnte. Der Unterschied der Kraftgrößen aus der Simulation ($F_{Seh, a_0} = 143,26 \text{ N}$) und dem Versuch ($F_{Sehne, a_0} = 189,41 \text{ N}$) ist deutlich. Dabei wird zum Vergleich die Knicklast (Gl. XII. 23) von der Sehnenkraft im Versuch deutlich überschritten:

$$\text{Gl. XII. 23} \quad N_k = \frac{\pi^2 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 0,0299 \text{ cm}^4}{(200 \text{ cm})^2} = 154,9 \text{ N}$$

Obwohl es sich beim E235 um die normalgeglühte Qualität N handelt, ist es erforderlich die Arbeitslinie des Werkstoffes experimentell zu bestimmen, um einen realistischen Wert in der Simulation ansetzen zu können.

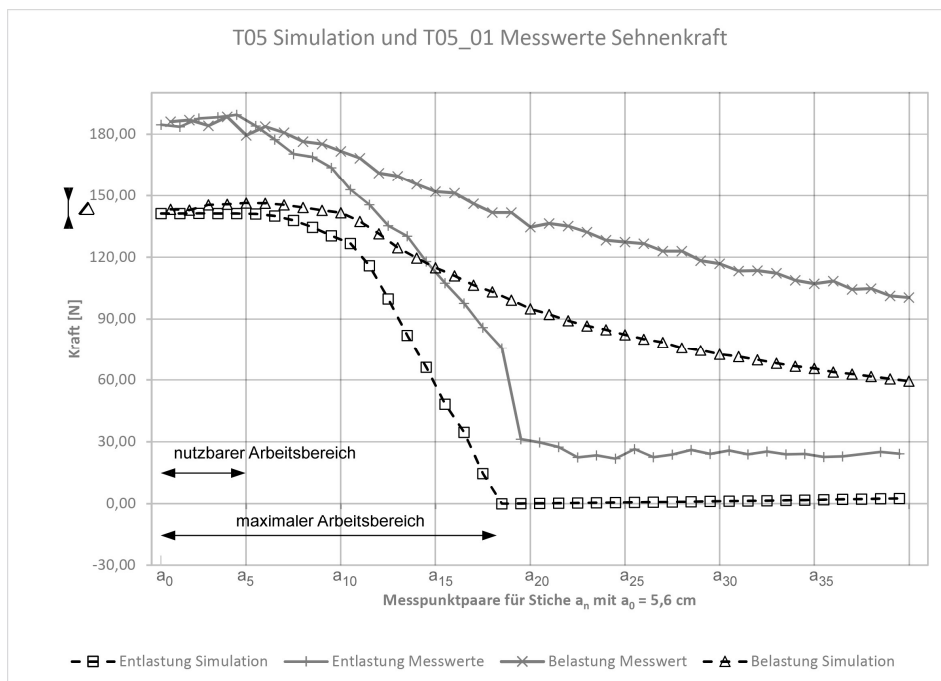


Abb. XII. 16: Auswertung der Sehnenkraft bei a_n Stichen

Es wird hier der Arbeitsbereich gekennzeichnet, der sich in einen maximalen und nutzbaren differenzieren lässt; s. dazu Abb. XII. 9. Sowohl die Simulation, als auch das Experiment zeigen von Anbeginn leichte plastische Verformungen, die aber bis Messpunkt 11 klein ausfallen. Dagegen erstreckt sich der *maximale Arbeitsbereich* bis Messpunkt 17, ab

dem durch große plastische Verformungen der Ausgangsstich von a_0 nicht mehr erreicht werden kann.

Es kann beobachtet werden, dass in beiden Kurven zunächst ein Anstieg der Kraft, $\Delta \approx 3,1 \text{ N}$ in der Simulation, bei zunehmendem Stich bis a_5 vorliegt, sodass eine Beschränkung des Arbeitsbereiches auf a_5 sinnvoll erscheint, da so Reserven mit höherem Widerstand auf der sicheren Seite liegen (s. Abb. XII. 17).

Anm. zu Abb. XII. 10:
Die Abb. Entspricht einer
Ausschnittvergrößerung
der Abb. XII. 16.

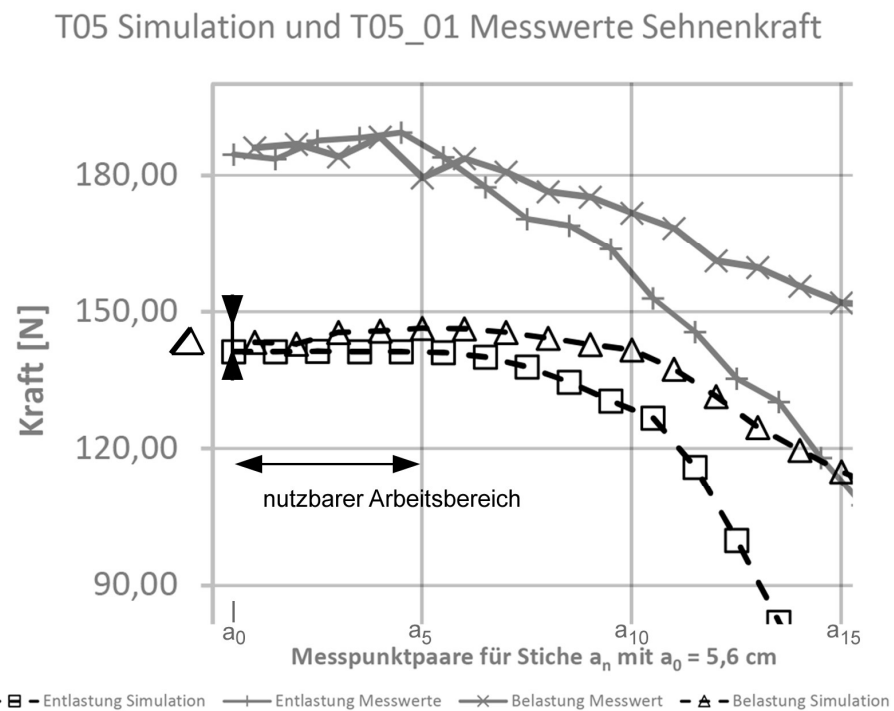


Abb. XII. 17: Anstieg der Sehnenkraft Δ in Versuch und Simulation

Diese Zunahme der Kraft kann vermutlich mit der Gelenkbildung durch beginnende plastische Verformungen in Zusammenhang gebracht werden; es bedarf aber an dieser Stelle einer genaueren Diskussion, inwieweit Effekte aus der Geometrieänderung durch Verformungen oder Änderungen der Materialeigenschaften durch Kaltverfestigung beteiligt sind.

Die Abb. XII. 18 zeigt die drei Probekörper nach der Beprobung mit deutlichen Verformungen. Bei Probekörper T05_03 ist abweichend zu den Spezimen T05_01 und _02 ein schärferer Knick im Scheitelpunkt zu sehen. Es wird vermutet, dass durch lokale Störungen sich hier frühzeitig ein plastisches Gelenk ausgebildet hat, sodass in den zwei Schenkeln des Rohres nur noch elastische Biegespannungen erreicht wurden, die nach der Entlastung wieder zu annähernd geraden Rohrschenkeln führten. Den Proben T05_01 u. _02 ist gemein, dass die großen, bleibenden Verformungen durch Krümmungen im middle-

ren Fünftel der Rohrlänge ursächlich sind, wo das Maximum der Biegespannung anzusetzen ist, sich aber auch leichte Verformungen über die gesamte Länge nachweisen lassen; die Biegefigur der theoretischen Sinuskurve ist in grober Näherung nachvollziehbar.

Da ein a_0 durch verschiedene Kraft- bzw. Momentenzustände in einen Stab eingeprägt werden kann, die bei identischem a_0 abweichende Biegelinien aufweisen, soll abschließend exemplarisch die notwendige Punktlast zur Einprägung der Vorkrümmung in einem ersten Schritt über die Gl. XII. 5 in der Gl. XII. 24 genähert werden:

$$F_{\text{präg.}} = \frac{a_0 \cdot 48 \cdot EI}{l^3}$$

Gl. XII. 24

$$F_{\text{präg.}} = \frac{5\text{cm} \cdot 48 \cdot 21000 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} \cdot 0,0299\text{cm}^4}{(200\text{cm})^3}$$

$$F_{\text{präg.}} = 0,019\text{kN}$$

Anm. zu Gl. XII. 24:

Die hier ermittelte Punktlast bewirkt einem maximalen Stich, wie er für den Druckstab gefordert ist; es ist aber zu beachten, dass die Biegelinie des Biegebal-kens eine abweichende von der sinusförmigen Biegelinie des Druckstabes ist. Vgl. Abb. XII. 4 u. 7

Wird diese eingeprägte Vorkrümmung aus der Biegebeanspruchung mit einer Sehne »eingefroren«, so ergibt sich eine theoretische Zugkraft in der Sehne F_{Sehne} für dieses Gleichgewicht, wie sie in Simulation und Experiment bestimmt werden konnte.

Für den Stabquerschnitt T05 ergibt sich unter Berücksichtigung der Exzentrizität $e = a_0$ bei 186,11 N (Versuch) und eines elastischen Materialverhaltens ohne Geometrieänderung eine Maximalspannung von:

Gl. XII. 25

$$\sigma = \frac{N}{A} + \left| \frac{F \cdot e}{W} \right|$$

$$\sigma = \frac{0,186\text{kN}}{0,1806\text{cm}^2} + \left| \frac{0,186\text{kN} \cdot 5\text{cm}}{0,0498\text{cm}^3} \right|$$

$$\sigma = 19,7 \frac{\text{kN}}{\text{cm}^2} = 197 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

Diese Spannung liegt noch im linear elastischen Bereich des Werkstoffes E235 mit nominell $R_{eH} = 235 \text{ N/mm}^2$ und erfüllt die Forderung nach der elastischen Reserve.



Abb. XII. 18: Plastisch verformte Probekörper nach Beprobung

12.3.3 Leichtbaukennwerte des stabförmigen Hybriden T05

Der geformte Hybrid, im Wesentlichen bestehend aus einem Stahlpräzisionsrohr von 200 cm Länge und einer Stahldrahtsehne, kann aus dem Versuch für a_0 eine Kraft von 0,186 kN aufnehmen. In einem statischen System ist die Netzlänge gleich der Sehnenlänge von 197,6 cm bei dem gewählten a_0 anzusetzen.

Das Eigengewicht des stabförmigen Hybriden wird durch Lastannahmen bestimmt und in einem ersten Schritt die Leichtbaukennzahl nach Mengerlinghausen ermittelt (vgl. Kapitel 9.3.2):

$$\text{Hohlprofil T05: } 0,14 \frac{kg}{m}; \text{ Sehne: } 0,006 \frac{kg}{m}$$

$$\text{Gl. XII. 26} \quad \left(2m \cdot 0,14 \frac{kg}{m}\right) + \left(2m \cdot 0,006 \frac{kg}{m}\right) = 0,292kg$$

$$F_{a_0} = 0,186kN \triangleq 18,25kg$$

$$\text{Gl. XII. 27} \quad Z_L = \frac{P_G}{P_E} = \frac{18,25kg}{0,292kg} = 62,5$$

Die Berechnung von Z_L erfolgte hier nach der allgemeinen Form, da die spezielle Formel für Knickstäbe nach Mengerlinghausen bereits die Beschränkung auf $\lambda \leq 250$ in sich trägt und über das ω -Verfahren auch die nutzbaren Materialfestigkeiten einfließen (s. Gl. IX. 6). Die Leichtbau-Kennzahl ist daher nur bedingt für einen Vergleich mit extrem schlanken Druckstäben des Formleichtbaus geeignet (vgl. Abb. IX. 12).

In einem zweiten Ansatz wird der stabförmige Hybrid nach den Kennwerten Frei Ottos betrachtet (s. Kapitel 5.7):

$$\text{Gl. XII. 28} \quad \lambda_{rel.Konstr.} = \frac{s}{\sqrt{F_{Bruch}}} = \frac{1,976m}{\sqrt{186N}} = 0,14 \frac{m}{\sqrt{N}}$$

$$\text{Gl. XII. 29} \quad Bic = \frac{m}{F \cdot s} = \frac{292g}{186N \cdot 1,976m} = 0,79 \frac{g}{Nm}$$

Die *Relative Konstruktive Schlankheit* ergibt sich hierbei zu 0,14 und ein *Bic* von 0,79. Im Bic- λ -Diagramm des Institutes für leichte Flächentragwerke kann dieses Wertepaar im Bereich der sehr schlanken Druckkörper verortet werden (Abb. XII. 19).

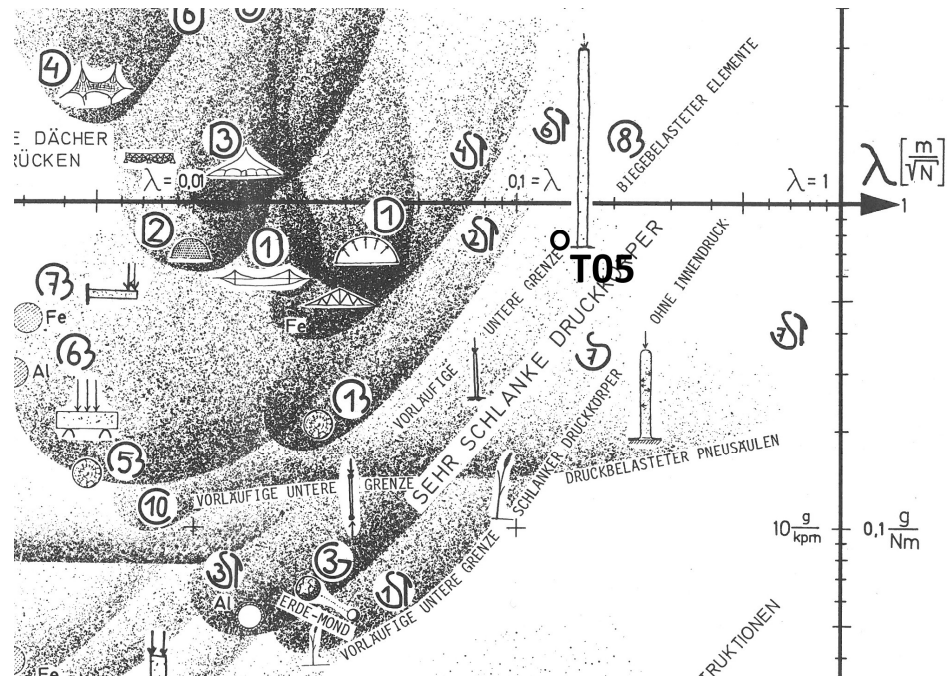


Abb. XII. 19: Einordnung des stabförmigen Hybrides T05 im Bic- λ -Diagramm nach Frei Otto

12.4 Bewertung

Anm. :

Der Begriff *Tragwerks-Hybrid* ist dem Begriff Tragwerkselement nach Büttner & Hampe entlehnt und bezeichnet eine physische Entität.

Dem entsprechend ist *Tragstruktur-Hybrid* der abstrakte Modellbegriff hierzu.

Es konnte ein stabförmiger *Tragwerks-Hybrid* aus konventionellen Elementen entwickelt werden, dessen Verformungs- und Tragverhalten von dem der geraden Eulerstäben abweicht. Den geforderten Charakteristika a) bis e) und i) bis ii) aus Kapitel 12.0 konnte dabei in weiten Teilen entsprochen werden.

Die Beschreibung des Verformungs- bzw. Tragverhaltens am Modell erfolgte in ersten Näherungen ausreichend genau und könnte unter Anwendung bekannter Methoden, bei steigendem Aufwand, präzisiert werden.

Die gewählten Halbzeuge, Präzisionsstahlrohr aus E235 und Stahldrahtsehne aus C80, lassen sich mit einfachen Mitteln zu einem Tragwerks-Hybriden kombinieren. Dieser Hybrid mit einer Schlankheit von $\lambda \approx 500$ für das Hohlprofil kann gemäß den Leichtbaukennwerten Frei Ottos bereits im Randbereich des Leichtbaus verortet werden, obwohl die Werkstoffkennwerte des Stahls E235, nach der Gleichung X.5 bzw. X.6, deutlich unter den empfohlenen Mindestwerten für Active-Bending-Strukturen zurückbleiben.

Auf Grundlage des entwickelten Prinzips des *Tragstruktur-Hybriden* ist die Übertragbarkeit auf Werkstoffe mit günstigerem Verhältnis von Biegezugfestigkeit zu E-Modul möglich und empfehlenswert. Eine Untersuchung des Einflusses des *effektiven E-Moduls* auf Grundlage des Gestaltformfaktors φ wurde an dieser Stelle nicht verfolgt und wird im Ausblick verortet.

Anm. zu Gl. X. 5/6:

Für E235 ergibt sich:

$$\frac{\sigma_{M,Rd}}{E} = \frac{410 \text{ MPa}[\text{I}]}{210 \text{ GPa}[\text{I}]} \approx 1,95$$

Hier wurde die gemittelte nominelle $\sigma_{M,Rd}/R_m$, aus Unkenntnis der Arbeitskurve, aus der Simulation angesetzt. Eine Berücksichtigung des höheren, effektiven E-Moduls, aus dem Einfluss der Gestaltform φ (Gl. X. 7 bzw. 8) bedingt, würde den Quotienten deutlich verbessern.

Der prognostizierte *nutzbare Arbeitsbereich* dieses Hybriden im Modellstadium weist ausreichend Tragfähigkeit auf, die mit $F_{\text{Sehne},a_0} = 189,41\text{N} > P_k = 155\text{N}$ deutlich oberhalb der Knicklast eines geraden Profils gleicher Schlankheit liegt.

12.5 Anwendungsmöglichkeiten

Das entwickelte Tragstrukturelement folgt einem Prinzip, das sich auf verschiedene stabförmige Elemente aus unterschiedlichen biegeweichen Materialien übertragen lässt. Es kann somit die absolute Tragfähigkeit und der Arbeitsbereich in einem weiten Bereich eingestellt werden. Es handelt sich hierbei um ein Tragwerkselement, das bei Druckbeanspruchung entlang der Wirkungsline der Sehne federnd reagiert und sichtbare, reversible Verformungen für den gültigen Arbeitsbereich aufweist. Aus diesen Charakteristika können beispielhaft Anwendungsfelder aufgezeigt werden:

- 1) Punktstützen zur Vorspannung von Zeltmembranen: Der Arbeitsbereich wird zur elastischen Stützung herangezogen. Der Sehne kann eine gespannte Translationsfeder in Form einer konventionellen Spiralfeder zwischengeschaltet werden, sodass bei einer Kopfverschiebung kein Erschlaffen der Sehne im Arbeitsbereich eintritt.
- 2) Aktuator in adaptiven Tragwerken: Der Sehne wird ein geregelter Spann-Mechanismus zwischengeschaltet, um die Gesamtlänge des stabförmigen Tragelementes verändern zu können. Die veränderliche Gesamtlänge kann beispielsweise zur Verstellung von Sonnenschutzelementen oder Vordächern genutzt werden.
 - a. Eine weitere Anwendung ergibt sich in Lastpfadmanagementsystemen⁵, wo durch gezielte Veränderung von Stablängen in einem regulären Fachwerk eine dem geänderten Lastfall optimierte Stabausnutzung gesteuert werden könnte.

Die genannten Beispiele stellen Randbereiche des traditionellen Hochbaus dar und das stabförmige Tragwerkselement fungiert nach der weiten Definition Dankerts & Dankerts als federnder Druckstab mit translativen Federeigenschaften. Grundsätzlich ist dieses stabförmige Tragwerkselement zur Substitution traditioneller Stäbe geeignet, wenn Verformungen zulässig sind.

Ein verändertes Tragverhalten stellt sich ein, wenn das Verformungsverhalten der Biegefigur behindert wird (Abb. XII. 20). In diesem Beispiel wird durch ein zusätzliches Seil am Kopf der Figur c) in Abb. XII. 20 eine seitliche Verschiebung der Köpfe durch die Lasten

⁵ Siehe.: Teuffel: Adaptive Strukturen, 2004

F_2 behindert, zusätzlich stützen sich die Scheitelpunkte der beiden gekrümmten stabförmigen Elemente gegeneinander ab; $a_{be.}$ begrenzt sich auf beiden Seiten gegenseitig. Das System hat in dieser Kombination zweier federnder stabförmiger Elemente seine Federwirkung verloren.

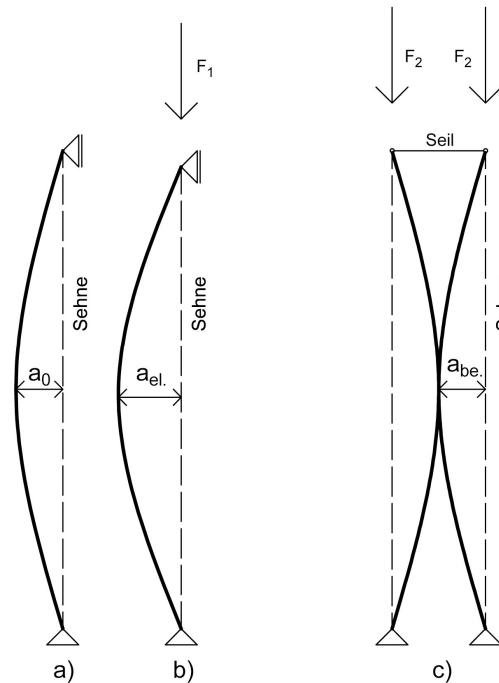


Abb. XII. 20: Behinderung der Biegefigur bei Kombination zweier Elemente in einer Ebene mit Kopplung der freien Enden

Da ein Ausweichen bzw. Durchschlagen des Berührungspunktes der Scheitelpunkte aus der Ebene heraus anzunehmen ist, kann durch die räumliche Anordnung dreier Hybride in drei Ebenen, mit 120° zueinander, ein Durchschlagen des Kontaktpunktes verhindert werden; ohne dass hier auf die konstruktive Detailausbildung des Kontaktpunktes genauer eingegangen werden soll.

In Abb. XII. 21 ist eine solche Dreierkombination schematisch dargestellt, die als räumliche Stütze oder Teilschuss eines Mastes dienen könnte. Die isometrische Figur b) zeigt deutlich die Anordnung der drei Hybride und deren Kopplung am Kopf, ohne dass die notwendige Torsionsaussteifung hier dargestellt wird. In einem physischen Modell kann die notwendige Torsionsaussteifung mit der Spannung des Stabes kombiniert werden, sodass die Sehne als direkte Verbindung von Fuß und Kopf des Stabes entfallen kann.

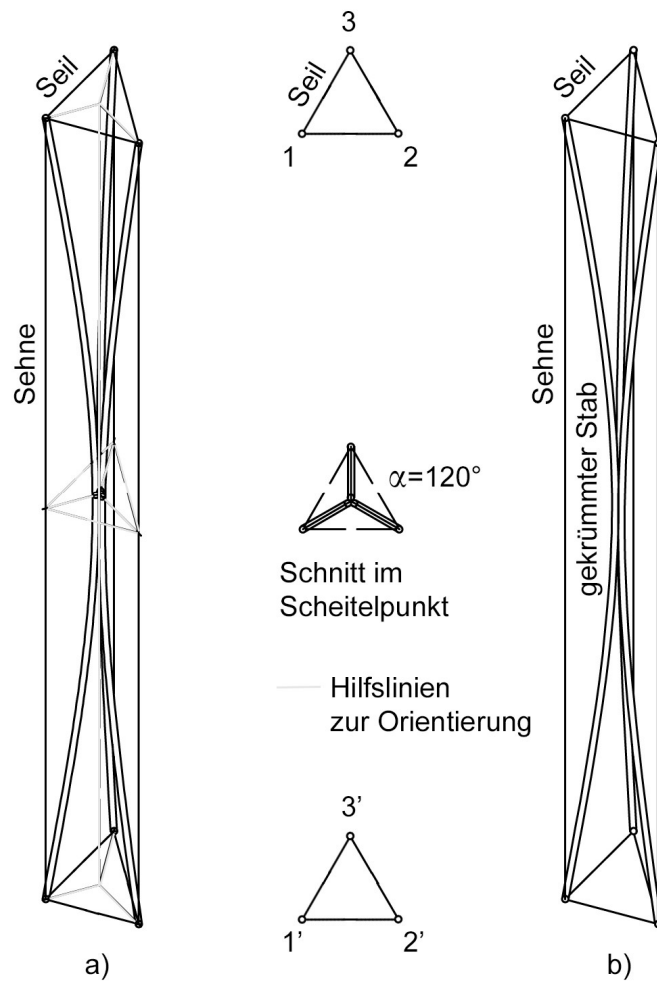


Abb. XII. 21: Maststruktur aus Hybrid T05 ohne Darstellung der Torsionsaussteifung und Knotendetail im Scheitelpunkt

Abbildungsverzeichnis Kapitel 12:

- Abb. XII. 1: Unterschiedliches Tragverhalten Eulerstab a) - b) und elastischer Stab mit eingprägter Vorverformung c) - d). Aus: Verfasser
- Abb. XII. 1a: Stabilitätsverhalten von Stäben im Modell und Realität. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 2: Grad der Vorverformung beim biegeweichen Stab. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 3: Definition des Arbeitsbereichs als Anteil der elastischen Verformung. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 4: Lastabhängige Verformungen am Biegebalken. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 5: Näherungsmodell zur Beurteilung der Kopfverschiebung bzw. Sehnenverkürzung bei konstanter Stablänge. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 6: Approximation der Kopfverschiebung bzw. Verkürzung der Sehne mit Krümmungskreisen. Aus: der Verfasser auf Datengrundlage Software: arndt-bruener□kreissehne siehe Anhang
- Abb. XII. 7: Spezielle Sinuskurve nach Vorgabe durch den gekrümmten Stab. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 8: Lastabhängige Verformung des Stabes in der nichtlinearen geometrischen Betrachtung nach Kindmann. Aus: Kindmann, Rolf: Stahlbau, Teil 2: Stabilität und Theorie II. Ordnung. 4. Aufl., Ernst u. Sohn, Berlin, 2008, S. 38
- Abb. XII. 9: Simulation der Zugkraft in der Sehne bei unterschiedlichen Stichen a. Aus: der Verfasser auf Datengrundlage von Jahns, Hendrik: Software: Abaqus CAE 2016□T05
- Abb. XII. 10: Foto Versuchsaufbau mit schematischer Darstellung unten. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 11: Verdrehbares Festlager B mit freier Durchführung der Sehne zur Kraftmessdose. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 12: Detail der Drehlagerung mit freier Durchführung der Sehne. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 13: Abhängigkeit Sehnenlänge und Stich bei Probe T05_01 im Vergleich mit rechnerischen Werten. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 14: Abhängigkeit Sehnenlänge und Stich bei Probe T05_02. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 15: Abhängigkeit Sehnenlänge und Stich bei Probe T05_03. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 16: Auswertung der Sehnenkraft bei a_n Stichen. Aus: Verfasser und Simulation Henrik Jahns
- Abb. XII. 17: Anstieg der Sehnenkraft Δ in Versuch und Simulation. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 18: Plastisch verformte Probekörper nach Beprobung. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 19: Einordnung des stabförmigen Hybrides T05 im Bic- λ -Diagramm nach Frei Otto. Aus: Hrsg. Otto, Frei: Bic Stand 1985. [Plakat] Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, 1985, Ausschnitt ohne Legende
- Abb. XII. 20: Behinderung der Biegefigur bei Kombination zweier Elemente in einer Ebene mit Kopplung der freien Enden. Aus: Verfasser
- Abb. XII. 21: Maststruktur aus Hybrid T05 ohne Darstellung der Torsionsaussteifung und Knotendetail im Scheitelpunkt. Aus: Verfasser

13.0 Ergebnisse

Die Arbeit stellt den Begriff *Stab* in den Mittelpunkt einer semantischen Reflexion, um eine produktive Erweiterung dieses tradierten *terminus technicus* zu explizieren – die Ergebnisse dieser Arbeit sollen aber nicht allein auf das herausgearbeitete Explikat *Stabförmigkeit* reduziert verstanden werden.

Das Explizieren ist als anerkannte wissenschaftliche Methode, hier als Novice in den Kontext des konstruktiven Bauwesens, eingeführt worden. Es muss daher im Sinne einer Methodenkritik die Anwendbarkeit in der konkreten Fragestellung und ggf. darüber hinaus die allgemeine Eignung für einen Erkenntnisgewinn im Bauwesen, in diesem Ergebnis bewertet werden. Diese Methodenkritik wird den primären Ergebnissen aus den Kapiteln »Explikat« und »Synthese mit Hilfe des Explikats« zugerechnet und von sekundären Ergebnissen begleitet, die sich aus der Bearbeitung der einzelnen Abschnitte als eigenständige Erkenntnisse herausstellten.

13.1 Resümee

Im Resümee werden zunächst die Inhalte bzw. die Erkenntnisse der Abschnitte wiedergegeben, da sie sowohl für die primären, als auch die sekundären Ergebnisse im Fazit die argumentativen Grundlagen bilden. Aufgrund des Umfanges der Abschnitte können nicht alle Details resümiert werden; es werden daher die vertiefenden Kapitel, bis zur zweiten Gliederungsebene, am Rand referenziert.

13.1.1 Aus dem Abschnitt Einleitung und Fragestellung

Kapitel 1.0

Die gewählte Methodik erforderte es, die physischen Stäbe der Makromaßstabsebene und die Vorstellungengen innerhalb ihrer Theoriebildung im Kontext des Bauwesens aus verschiedenen Perspektiven zu untersuchen.

Eine Abgrenzung war in so weit notwendig, da sich beim Begriff *Stab* ein assoziatives Feld¹ auftut, das den Rahmen dieser Arbeit übersteigen würde und sich einer wissenschaftlichen Fragestellung entzieht. Keine Beachtung fanden daher die soziokulturellen Aspekte, die den technischen Gegenstand in eine metaphysische Ebene heben, so wie es sich mit den Kultobjekten Zauberstab oder Zepter etc. verhält.

Kapitel 6.3

Der Exkurs Urhütte ist in diesem Sinne eine Grenzbetrachtung, da der *initium topos* Urhütte ein Objekt der metaphysischen Ebene ist, das sich aber Stäben aus rohen Ästen und lebenden Stämmen zu seiner

¹ Siehe: online: www.dwds.de □ Stab

Realisierung bedient. Es konnte aber herausgestellt werden, warum sich Äste und Stämme für eine *Realistische Allegorie* scheinbar bestens eignen, auch wenn massiv gegen konstruktive Regeln verstoßen wird.

13.1.2 Aus dem Abschnitt Grundlagen

Es konnte zu Beginn gezeigt werden, dass der Begriff *Stab* im Kontext des Bauwesens vielschichtig ist, aber sein Gebrauch bestimmten Konventionen folgt, die es gestatten, ihn als *terminus technicus* anzuerkennen. Die verbleibende Unschärfe dieses technischen Begriffs wird nicht als Malus aufgefasst: vielmehr wurde der Hypothese gefolgt, dass damit auch latente Eigenschaften von Stäben vorliegen, die in einer inhaltlichen Erweiterung des Begriffs wieder ein expliziter Bestandteil werden können. Diese erkannte Unschärfe bildete die Grundlage zur Einführung der Methode des *Explizierens*², die mit einem Rückgriff auf die vielschichtige Bedeutungsebene eines etablierten Begriffs eine sinnvolle, produktive Erweiterung gestattet.

Kapitel 2

Ausgangspunkt bildete die etymologische Betrachtung. Es konnte gezeigt werden, dass die umgangssprachliche Bedeutungsherkunft des Begriffs *Stab* und seiner Synonyme das weite Spektrum der genuinen Stäbe, bevorzugt die der Hölzer, in ihrem Erscheinungsbild und ihrem Tragverhalten zutreffend beschreibt. In der Abb. XIII. 1 wird diese Erkenntnis zum ersten Zweig der bildhaften Verwendung genommen.

Kapitel 3

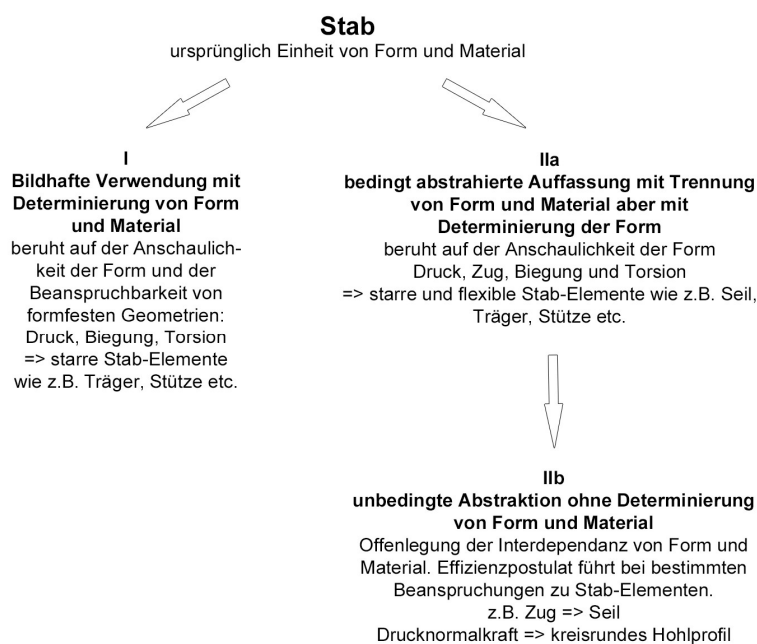


Abb. XIII. 1: Abstraktionsstufenmodell des Stabes im Bauwesen aus Kapitel 3

² Siehe Carnap: Induktive Logik, 1959

Dem gegenüber hat sich der Stab in den konstruktiven Disziplinen im zweiten Zweig des Abstraktionsstufenmodells der Abb. XIII. 1 zu einer dimensionslosen Modellvorstellung bei Dankert & Dankert³ im Schritt *Iib* entwickelt. Die Gestaltform und Materialität sind hier Variablen, die der Art der Beanspruchung angepasst werden können, die sich aus der Qualität der Gelenke ergibt.

Als gebräuchlich erweisen sich immer noch die Abstraktionsstufen *I* und *Iia* der Abb. XIII. 1, die daher eingehender untersucht wurden. Es werden sowohl physische als auch abstrakte Objekte hierunter verstanden, die aber bei genauer Betrachtung eine hohe Varianz innerhalb ihrer Merkmale aufweisen. Die unteren Grenzmaße für physische Stäbe reichen hierbei von $b \cong d < 1$, bei Büttner & Hampe⁴, bis $\frac{1}{d} \geq 2$, bei Müller & Alles⁵.

Kapitel 5

s. auch Kapitel 8.4

Sind die unteren Grenzmaße ein definitorischer Versuch, die Stäbe qualitativ zu erfassen, so ist die Entwicklung des Begriffs der Schlankheit von zentraler Bedeutung für das Verständnis des Niveaus der quantitativen Bewertung des Tragverhaltens, das aus der Empirie kommend in die Theoriebildung führte. Die dargestellten Entwicklungen zum Kriterium der Schlankheit über einen Zeitraum von 500 Jahren zeigen, dass es trotz eindeutiger experimenteller Ergebnisse lange Zeit dauerte, bis die Schlankheit als Ausdruck des Widerstandes eines Druckstabes gegenüber Stabilitätsversagen erfasst wurde. Eulers theoretische Erkenntnisse⁶ hierzu mussten sich aber in ihrer Folgezeit gegenüber dem Deutungsanspruch des Empirikers Hodgkinson⁷ durchsetzen. Bis ins späte 19. Jahrhundert besaß Hodgkinsons Bemessungsansatz eine große Persistenz, der sich, dank großer Sicherheitsfaktoren für Stützen aus Gusseisen, nicht destruktiv auswirkte.

Eulers analytischer Ansatz in *De curvis elasticis*⁸ war in seiner abstrakten Betrachtung von elastischen Linien als mathematisch exakte Lösung des Stabilitätsverhalten von Stützen nicht lösungsorientiert für die Praxis angelegt. Die Erforschung von Prinzipien auf Grundlage von Naturgesetzen war sein persönlicher, intellektueller Beitrag zum Nachweis einer höheren Ordnung, die sich mit einer göttlichen Weltordnung vertrug.⁹ So ist die zitierte Anwendung seines mathematischen Lö-

³ Dankert/Dankert: Technische Mechanik, 2013, S. 70

⁴ Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 1, 1977, S. 140

⁵ Müller/Alles: Grafische Statik, 2003, S. 47

⁶ Siehe: Euler: lineas curvas, E065, 1744

⁷ Siehe Hodgkinson: Strength of Pillars, 1840

⁸ Siehe: Euler: lineas curvas, E065, 1744, S. 245

⁹ Siehe: Straub: Geschichte der Bauingenieurkunst, 1992, S. 115

sungsweges auf eine Stütze in Abb. XIII. 2 eher als beiläufiger Anwendungsfall zu verstehen, ohne dass er damit den Anspruch verband, ein umfassendes Bemessungssystem daraus entwickeln zu wollen.

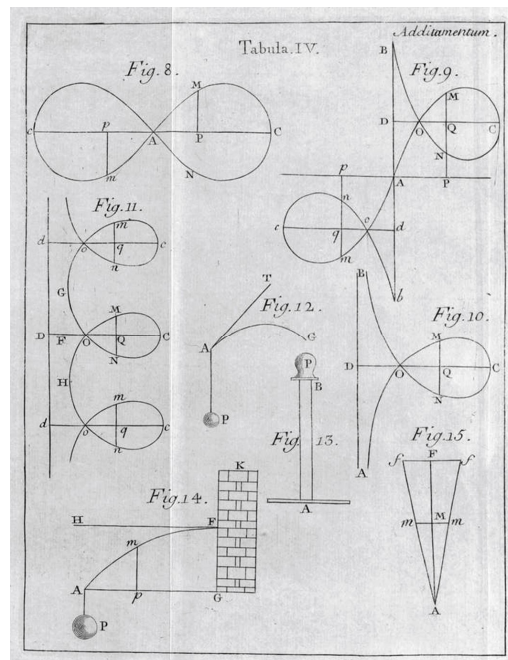


Abb. XIII. 2: Fig. 13 zeigt eine Säule der Länge AB mit vermutlich quadratischem Querschnitt und generischem Gewicht P aus Kapitel 5

Die Euler-Hyperbel wird aber spätestens mit der Einführung des ω -Verfahrens zur Grundlage von Bemessungssystemen. Die mathematisch beschriebenen Randbedingungen werden, wie z.B. die Lagerung oder der Trägheitsradius bzw. die Schlankheit λ , zur Steuerung des Designs eines Stabes aktiv genutzt. Im Umkehrschluss konnte die Biegesteifigkeit EI durch die neuen Eisenwerkstoffe, mit ihren hohen E-Modulen und der Vielfalt an verfügbaren Querschnittsformen, gesteigert werden. Das Bauteil Stab wurde der Asymptote des geraden, steifen Stabes der Theorie stark angenähert.

Ein neuer Aspekt zur Bewertung von Stäben im Bauwesen wurde in der Fragestellung nach dem Verhältnis der Traglast zum Konstruktionsgewicht durch den Leichtbau erkannt. Die Ansätze des Form- und Stoffleichtbaus hatten eine große Bedeutung für die Leistungssteigerung in den konstruktiven Mobilitätsfächern erlangt und ist in Teilaspekten vom Bauwesen für mobile und immobile Architekturen adaptiert worden. Mit der *Relativen Konstruktiven Schlankheit*¹⁰ wurde von Frei Otto ein quantitativer Begriff eingeführt, der zur Bewertung von Druckstäben im Sinne des Leichtbaus geeignet ist, da er sowohl den Form- als auch den Stoffleichtbau erfassen kann.

¹⁰ Siehe: Otto: IL 21 Grundlagen Form-Kraft-Masse, 1979), S. 44f, bzw. Siehe: Otto: IL 24 Prinzip Leichtbau, 1997

Die Untersuchung der verschiedenen Bedeutungsebenen und ihrer Entwicklungslinien hat gezeigt, dass der Stab als konstruktives Element der Meso- und Makro-Maßstabebene seinen Ursprung in natürlich vorkommenden Objekten der vorwiegend belebten Natur hat. Mit genuine Stäben werden hiernach Skelettteile von Tieren und Triebe bzw. Stämme von Pflanzen bezeichnet, die ohne oder zumindest geringe Bearbeitung durch den Menschen als Konstruktionselemente zur Anwendung kamen. In Abgrenzung dazu werden alle Stäbe aus abweichenden Werkstoffen und/oder Formgebungsverfahren hier als synthetisch bezeichnet. Dabei wird das Formgebungsverfahren definitorisch vorrangig gegenüber der Werkstoffgruppe berücksichtigt.

s. auch Kapitel 7.7

Innerhalb der Gruppe der synthetischen Stäbe werden die hohlen Stäbe aus Eisenwerkstoffen als besonders leistungsfähige identifiziert. Mit dem Metallguss konnte auf ein geeignetes Formgebungsverfahren aus der Schmuck- und Waffenproduktion zurückgegriffen werden, das es gestattet, den druckfesten Werkstoff Gusseisen in den günstigen Querschnitt des Kreisrings abzuformen. Die serielle Herstellung von schmiedeeisernen Röhren gelang erst mit den Patentverfahren von Henry Osborn¹¹ 1812, bzw. Cornelius Whitehouse¹² 1825, aus feuergeschweißten Blechen, die in Form der Längsnaht aber eine strukturelle Schwachstelle besaßen und zunächst für die Herstellung von Handfeuerwaffen bzw. für den Gebrauch im Rohrleitungswesen für Trinkwasser oder Leuchtgas ausgelegt waren.

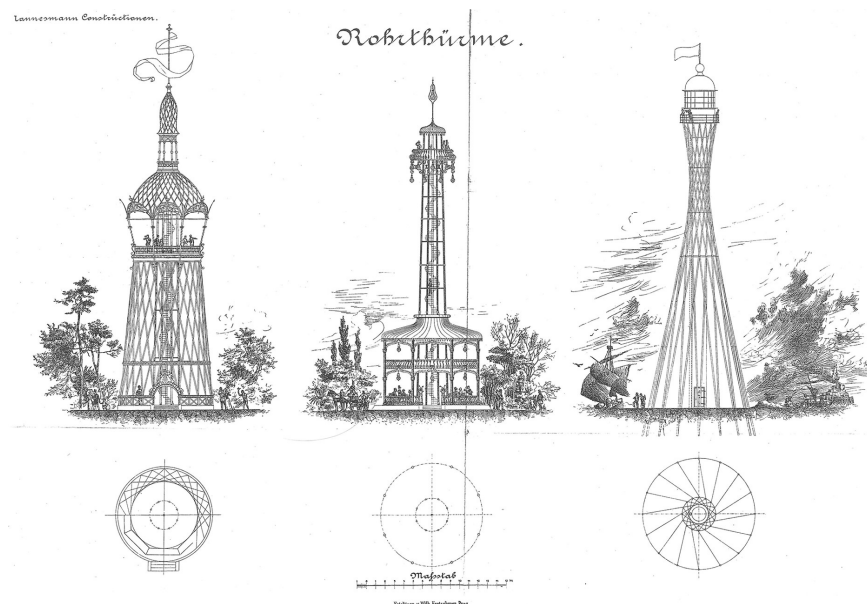


Abb. XIII. 3: Rohrthürme [sic] der Fa. Mannesmann aus nahtlosem Stahlrohr, unrealisiert
vermut. 1892 aus Kapitel 8

¹¹ Marks: Manufacture of Tubes, 1903, S. 2-3

¹² Bousse: Die Fabrikation nahtloser Stahlrohre, 1908, S. 332

In dieser Tradition war das nahtlose Stahlrohr der Brüder Mannesmann mit seinen patentierten Formgebungsprozessen, dem Schrägwalzverfahren¹³ und dem Pilgerschrittverfahren¹⁴, ab 1885 für Anwendungen im Rohrleitungsbau mit hohen Drücken entwickelt worden. Die überzeugende Qualität für Druckstäbe im Bauwesen wurde aber zeitgleich erkannt und in Form von Projektskizzen für *Röhrenthürmen* der Öffentlichkeit vorgestellt. (Abb. XIII. 3)

s. auch Kapitel 8.6

Unter Hohlprofilen werden heute Rohre gemäß EN 10266¹⁵ verstanden, die zur Anwendung im Stahlbau vorgesehen sind und vom Kreisringquerschnitt abweichen können. Die Klassifizierung erfolgt im Wesentlichen auch heute noch nach der Art des Formgebungsprozesses als kaltgefertigte¹⁶ bzw. warmgefertigte¹⁷, wobei das kaltgefertigte mit seiner Längsschweißnaht keine bedeutenden Nachteile mehr aufweist.

13.1.3 Aus dem Abschnitt Vertiefung

Der Hauptteil der Arbeit ergründete in drei Kapiteln die Entwicklungslinien von Rohrleitungen und hohlen Stäben aus Eisenwerkstoffen und ihre Berührungspunkte. Es wurde u.a. der Frage nachgegangen, wo tragende Konstruktionen zur erstmalig Anwendung kamen, worin die besondere Eignung für den Lastabtrag bestand und im dritten Aspekt welche Optimierungsstrategien zur Effizienzsteigerung als Pendelstab entwickelt wurden. Diese drei Kapitel sind synoptisch angelegt und ermöglichen so einen Perspektivwechsel mit Querverweisen hinsichtlich der Fragestellungen nach Ursprung, Eignung und Optimierung, die sich zueinander interdependent verhalten.

Kapitel 7-9

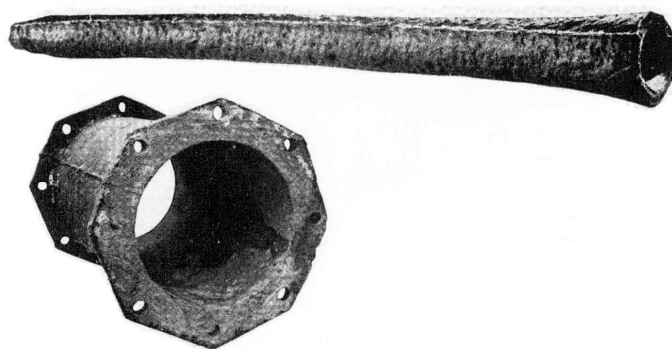


Abb. XIII. 4: Oben Muffenrohr Schloss Dillenburg 1455, unten Flanschenrohr Schloss Versailles 1686 aus Kapitel 7

¹³ Deutsches Reichspatent #34617

¹⁴ Deutsches Reichspatent #59052

¹⁵ EN 10266: Stahlrohre und Hohlprofile, 2003

¹⁶ DIN EN 10219-1: Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile, 2006

¹⁷ DIN EN 10210-1: Warmgefertigte Hohlprofile, 2006

Der Ursprung als Gefäß wurde für Rohre aus Eisenwerkstoffen entwicklungsgeschichtlich an den Beispielen der Trinkwasserversorgung (Abb. XIII. 4), des Leuchtgas und der Rohrleitungen für Dampfmaschinen beschrieben. Es wurde herausgestellt, wie ein archetypisches Formkonzept für ein Gefäß, zunächst strömungstechnisch und erst folgend statisch, erschlossen wurde. Als Biegeträger übernimmt es in Randbereichen seiner Anwendung, synergetisch die Funktion »Leiten und Tragen« bis heute. Die im Rohrleitungsbau entwickelte Lösung zur Gewährleistung der Dichtigkeit bei Druckleitungen, in Form der verschraubten Flanschen (Abb. XIII. 4 unten), kommt bereits 1686 in Versailles¹⁸ zur Ausführung. Diese Entwicklung wird aber erst spät zur kraftschlüssigen Verbindung für Gussstützen adaptiert. Die Gewinde-Muffen-Verbindung der Gasleitungen war dagegen von untergeordneter Bedeutung für Stahlrohrstützen und fand in der Verankerung von massiven Querschnitten für Zugstäbe Eingang in den konstruktiven Hochbau.

Eine parallele Entwicklungslinie lässt sich in den freitragenden, gusseisernen Aquädukten der schiffbaren Kanäle des 18. Jahrhunderts in England beobachten, die aus plattenförmigen Gussteilen gefügt wurden. Auch hierbei handelte es sich noch um selbsttragende Gefäße.

In diesem funktionalen Zusammenhang sind die genieteten Kessel und Schiffsrümpfe ab 1819 auch als selbsttragende Gefäße aufzufassen, deren assemblierte Bauweise sich jetzt aber dem zug- und druckfesten Schmiedeeisen bzw. Puddelstahl bediente. Die leistungsfähige Gestaltfestigkeit wurde zeitgenössisch exemplarisch an einem verunglückten Stapellauf eines genieteten Schiffsrumpfes beobachtet, der unglücklich auf zwei Stützpunkten zum Liegen kommt und seine herausragende Biegesteifigkeit beweist. Es ist von Culmann¹⁹ überliefert, dass dieses Konstruktionsprinzip für biegesteife Träger mit rechteckigem Lichtraumprofil unter der Bezeichnung *Röhrenbrücke* für die ersten weitgespannten Eisenbahnbrücken zur Anwendung kam. Diese Entwicklungslinie ist in so weit bemerkenswert, dass mit den Röhrenbrücken Britannia (1846-1850) und Conway (1846-1848) erneut das Durchleiten, in Form der wettergeschützten Zugpassage, und das Tragen als Biegeträger, in einer Gestaltform zusammengeführt wurden. Brunel glaubte dagegen im kreisrunden, assemblierten Großrohr ein ausschließliches Tragwerkselement für einen optimierten Biegebalken großer Spannweite erkannt zu haben, der sich beulsteif aus gebogenen Schmiedeeisenplatten mit innenliegenden Versteifungselementen formen ließ. Erst mit der Fachwerkauslegerbrücke über den Firth of Forth

¹⁸ Siehe: Tietze: Vom Blasrohr zur Kontinental-Pipeline, 1979, S. 23ff

¹⁹ Siehe: Culmann: Eiserne Brücken, 1852

(1882-1892) kam das assemblierte Großrohr, mit innenliegender Versteifung, als Druckstrebe im Brückenbau zum Einsatz. Einen anderen Typ von Ingenieurbauwerken bildeten hier die ortsfesten Seezeichen, bei denen assemblierte Großrohre aus Eisenwerkstoffen bereits ab Mitte des 19. Jahrhunderts als Turmbauwerke eine relevante Drucknormalbeanspruchung, neben der Biegebeanspruchung aus Windlasten, aufnahmen.



Abb. XIII. 5: Erhaltener Querschnitt der Tragröhre mit Diaphragma von Isambard Kingdom Brunel, 1852 aus Kapitel 7

In Ermangelung eines nahtlosen Formgebungsprozesses für Rundrohre kleiner und mittlerer Durchmesser aus Stahl bis 1885 wird als Brückentechnologie das Quadranteisen und seine Derivate eingeführt, die sich bis in die 1920er Jahre halten können.

Neben dem Guss hohler Stützen und den assemblierten Stahlrohren wurde ein subtraktives Verfahren entwickelt, um präzise Innendurchmesser fertigen zu können. Der Metallguss war in der frühen Waffentechnik die Voraussetzung gewesen, um Vorderladergeschütze in einem Prozess formen zu können, aber mit den gestiegenen Ansprüchen an die Ballistik wurde das Kalibrieren durch Aufbohren des Laufes hier zum wesentlichen Formgebungsprozess für Gefäße hoher Präzision.

Kapitel 7.7

Die systematische Anwendung von Gusstützen ist für das ausgehende 18. Jahrhundert bei der Errichtung mehrgeschossiger Textilfabriken²⁰ in England belegt. Das Gusseisen empfahl sich aus dem damaligen Verständnis heraus, wegen seiner Nichtbrennbarkeit und dem geringen Konstruktionsraum bei hohen Traglasten. Neben diesen reinen Zweckbauten war eine Verwendung bei repräsentativen Bauwerken bald üblich, da sich eine stilistische Überformung durch Ornamente mit hoher Plastizität einfach realisieren ließ. Diese Formbarkeit

Kapitel 7.8

²⁰ Siehe: Bannister: The First Iron-Framed Buildings, 1950

im ästhetischen Sinne führte zu gestalterischen Lösungen, die antiken Säulen nachformten, ohne die eigentliche Leistungsfähigkeit in der konstruktiven Durchbildung angemessen zu berücksichtigen.

Die Eigenschaft auch feinste Details im Gussverfahren abformen zu können, wurde schließlich doch noch zur Entwicklung von Stützen als Systembauteile aus Gusseisen genutzt, die ihren Höhepunkt im viel zitierten Crystal Palace von 1851 bei London fanden.

Kapitel 7.9 – 7.10

Die im Leitungsbau entwickelten Flanschenverbindungen und die Formstücke für T-Abzweigungen etc. wurden für Bogenbrückenbauwerke und Gittermaste für Eisenbahnviadukte erfolgreich erprobt. Die Möglichkeit standsichere Hochstützen mit geschweiftem Fuß aus gekrümmten Gussformteilen realisieren zu können, war sicherlich inspirierend für den Aussichtsturm auf der Büchenbronner Höhe von 1883, der am Vorabend der Erfindung des nahtlosen Stahlrohres erstmalig aus dünnwandigen, gebogenen Schweißrohren von einer Rohrleitungsbaufirma errichtet wurde.

Kapitel 7.11

Kapitel 8

Ein erster Perspektivwechsel stellte, nach dieser Zusammenstellung der Entwicklungslinien, die latenten Eigenschaften der hohlen Stäbe aus Eisenwerkstoffen heraus, die im Kontext der jeweiligen Epochen einer Verschiebung ihres Schwerpunktes unterlagen. Beginnend mit der vermeintlichen Eignung für brandgefährdete Nutzungen und dem geringen Konstruktionsraum, wird die Wirtschaftlichkeit im Verhältnis zu den traditionellen Bauweisen immer wichtiger, die einen Ausgleich von Material- bzw. Herstellungskosten gegenüber den Arbeitskosten zur Errichtung der Konstruktion suchen. So war das Gusseisen in vielen Aspekten den historischen Baustoffen überlegen, fand aber im Schmiedeeisen, gefolgt vom Stahl, einen überlegenden Konkurrenten, der sich mit Etablierung der Mannesmann-Verfahren in die günstige Gestaltform des Kreisringquerschnittes bringen ließ.

s. auch Kapitel 7.6

Es konnte gezeigt werden, dass das Rohr mit dem Aufkommen der hohlen Stäbe aus Eisenwerkstoffen zunächst als Gussstützen für Druckstäbe Verbreitung fand und folgend assemblierte Großrohre aus Schmiedeeisen bzw. Puddeleisen zunächst als Biegeträger Verwendung fanden.

Kapitel 8.3

Galileis gedanklichen Experimente²¹ zur Beurteilung des Tragvermögens von Kragarmen, kannten den prinzipiellen Vorteil der Gestaltform bei gleicher Masse des Rohres gegenüber dem kreisförmigen Vollquerschnitt, blieb aber, wie Eulers Modell, zunächst ohne praktischen Bezug.

²¹ Siehe: Galilei: Discorsi, 1638, S. 147f

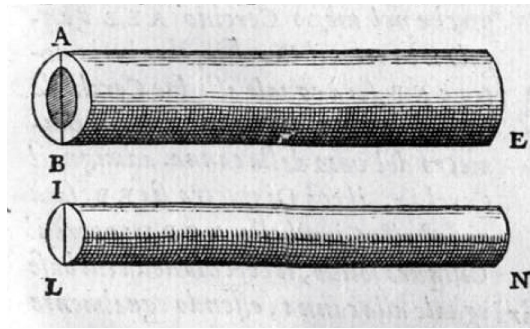


Abb. XIII. 6: Vergleich von Kragträgern gleicher Masse und Länge bei Galilei mit $F_E \gg F_N$, 1638 aus Kapitel 8

Anhand der Bemessungsverfahren für Gussstützen im ausgehenden 19. Jahrhundert konnte belegt werden, wie der Gestalteinfluss immer noch unzureichend berücksichtigt wurde. Auf der Grundlage zutreffender Bemessungsansätze konnte sich erst spät eine wirtschaftliche Vergleichbarkeit mit den traditionellen Bauweisen führen lassen.

Kapitel 8.4

Dieser Vergleich zwischen den Gruppen der verschiedenen Konstruktionsformen findet bei den Stahlrohren nur noch innerhalb der Walzprofile statt, da, abgesehen vom Stahlbetonbau, eine erhebliche Traglast bezogen auf den Konstruktionsraum vorliegt. Dem Hohlprofil werden eine Vielzahl von Attributen zugeschrieben, die es für alle Anwendungsformen zu empfehlen scheinen. Nach Petersen²² sind tatsächlich positive Eigenschaften zu nennen, die aber in einem Abwägungsprozess der vielschichtigen Mitsprache der unterschiedlichen Fachingenieure zu Einzelfallentscheidungen führen und keine absoluten Aussagen zur Eignung bestimmter Querschnittsformen gestatten. In dieser Konsequenz wurden die Attribute aus den Perspektiven der Fachplaner in dieser Arbeit erfasst: Konstruktion/Statik, Brandschutz, Aerodynamik, Korrosionsschutz bzw. Instandhaltung, Ästhetik und Ergonomie. Im Ergebnis ist der Anwendungsfall *echte Pendelstütze* einer der wenigen, wo die Eignung des kreisrunden Hohlprofiles leicht zu führen ist.

Kapitel 8.5

Dieser den Prinzipien des Ingenieurwesens verpflichtete Entscheidungsprozess auf Grundlage von nüchternen Abwägungen, standen die Vermarktungsstrategien der Röhrenhersteller gegenüber, die mit der Einführung der DIN 4115 *Stahlleichtbau und Stahlrohrbau im Hochbau*²³ neue Absatzmärkte für ihre Produkte erkannten und beispielhaft neue Anwendungsfelder hierfür nannten, wie z.B. Spielplatzgeräte oder Ausstellungs- und Werbebauten.

²² Siehe: Petersen: Stahlbau, 2013, S. 668ff

²³ DIN 4115: Stahlleichtbau, 1950

Kapitel 8.6

Dem gegenüber hatte der Anlagen- und Maschinenbau das Potential von nahtlosen Rohren für bestehende Anwendungen früh erkannt. Besonders die Kriegsmarine²⁴ spekulierte bereits in den 1890er Jahren über verbesserte Leistungen in der Antriebstechnik, für die neue Torpedowaffe oder bei der Realisierung von leichten und hohen Schiffsdeckaufbauten aus Stahlrohren für Fernbeobachtungen. Zivile Nutzungen ergaben sich für Windkraftanlagen, Bohrtürme- und Gestänge oder besagte Aussichtstürme.

Kapitel 8.7

Die Kriegsmarine wurde in der Vorgabe von Maßstäben an leichte, leistungsfähige Konstruktionen von der Luftfahrt abgelöst. Es waren zunächst die Luftschiffe und folgend die Flugzeuge selbst, die leichte, steife Bauweisen erforderten und den Form- und Stoffleichtbau begründen halfen. Das Aluminiumrohr entsprach im Zusammentreffen des leichten Materials und der Gestaltform diesem Entwicklungssprung im Form- und Stoffleichtbau. Im Zuge dieser neuen Mobilität sollten die Bauwerke, sowohl die der Utopisten als auch die des Militärs jetzt selbst mobil werden, was ihre Montierbarkeit und die Steigerung der Effizienz des Tragwerkes erforderte. Verschiedene Konstrukteure wie Bell (1847-1922), Le Ricolais (1894-1977), Buckminster Fuller (1895-1983), Wachsmann (1901-1980), Mengerinhausen (1903-1988) und Leonhardt (1909-1999) führten den Nachweis, dass Metallrohre sich für den Form- und Stoffleichtbau bestens eigneten, wenn man die Fügung lösbarer Knotenpunkte beherrschte.

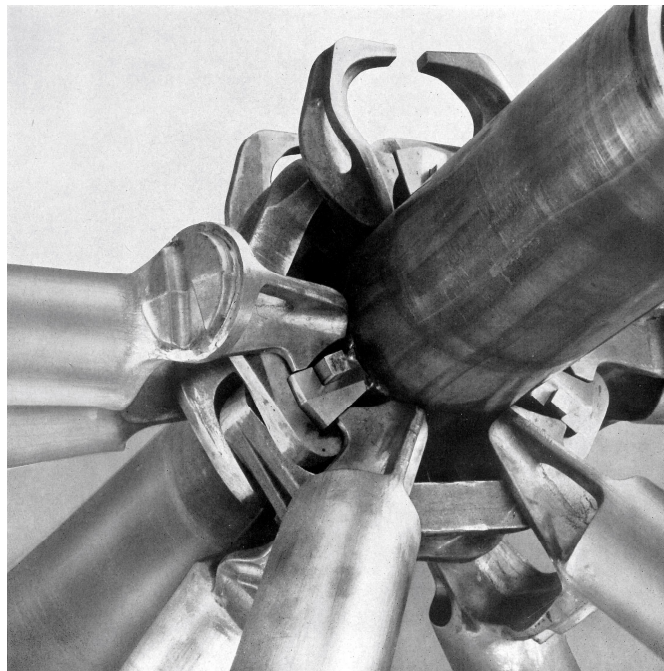


Abb. XIII. 7: Standardknoten Wachsmann, 1950er aus Kapitel 8

²⁴ Siehe: Schwanda: Mannesmannrohre in der Kriegstechnik, 1893, S. 302-335

Nachdem dargestellt werden konnte, dass die Gussstütze und folgend das Hohlprofil sich für die Konstruktion von Pendelstäben besonders eignen, werden aus Perspektive der Optimierungsbestrebungen verschiedene Strategien vorgestellt, die zu einer Steigerung der Effizienz im zuvor genannten Sinne beitragen.

Kapitel 9

In einer ersten Phase bestand die Optimierung zunächst in der Reduzierung der strukturellen und geometrischen Imperfektionen, die in den Anfängen der seriellen Gießtechnik einerseits auf der Werkstoffebene, z.B. in Form von Schlackenbildung bestand, und andererseits beim Formgebungsprozess zum Kernversatz mit schwankenden Wandstärken führte.

Kapitel 9.1

Ein erster Optimierungsschritt für Pendelstäbe im engeren Sinn bestand in der Anpassung der Gestaltform des Rohres durch Veränderung des Querschnittes über seine Höhe. Der ursprünglich konstante Trägheitsradius der Zylinderform konnte so in Form einer Schwellung zur halben Höhe hin bei gleicher Wandstärke moduliert werden, oder weniger effizient durch Zunahme der Wandstärke selbst an der maßgeblichen Stelle erhöht werden.

Kapitel 9.2

Andere Impulse kamen aus dem Naturstudium, das mit fortgeschrittener Mikroskopie und Photographie auch Einblicke in die Mikro und Meso-Strukturen von Flora und Fauna erlaubte, wie sie zunächst auch unter ästhetischen Gesichtspunkten von Blossfeldt (1865-1932) veröffentlicht wurden, und von den Konstrukteuren zur sinnvollen Analogiebildung erschlossen wurden.

Kapitel 9.3



Abb. 1.
Querschnitt durch einen Strohalm.

Abb. XIII. 8: Analogievorbild Querschnitt durch einen Strohalm, Fritz Leonhardt 1940
aus Kapitel 9

Der Formleichtbau der 1930er und 1940er Jahre brachte komplexe Rohrquerschnitte hervor, die bei dünnsten Wandstärken dem lokalen Beulen durch mehrschaligen Aufbau oder strukturierten Wandungen

begegneten und in der Tublaire ISOFLEX von Le Ricolais²⁵ einen Höhepunkt erreichten.



Abb. XIII. 9: Eléments Tubulaires ISOFLEX, Le Ricolais 1930er Jahre aus Kapitel 9

Ein älterer Ansatz bestand darin, sehr schlanke Druckstäbe durch seilverspannte Spreizen elastisch zu stützen und somit ein hybrides Tragwerkselement zu konstruieren. Die theoretische Knicklast eines Hohlprofils kann so, gegenüber dem gleichen Stab ohne Seilverspannung, bis zum Faktor 4 gesteigert werden, wie Schock²⁶ in seiner Arbeit ausführt.

Die Kombination des vorteilhaften Kreisringquerschnittes mit anderen Materialien oder Profilformen wird dagegen beispielhaft von Kloth²⁷ bereits 1947 vorgestellt. Leichtbaurohre lassen sich danach durch Anschweißen äußerer oder innenliegender Strukturen versteifen oder bei schweren Bauteilen ausbetonieren, wobei das Rohr hier dual als Gefäß für die verlorene Schalung dient und gleichzeitig als mittragender Querschnitt berücksichtigt wird.

13.1.4 Aus dem Abschnitt Komplementär

Die im Hauptteil betrachteten Entwicklungslinien von hohlen Stäben aus Eisenwerkstoffen, die Herausstellung ihrer besonderen Eignung für Druckstäbe und die Strategien zur Optimierung ihrer Gestaltform stehen in der Tradition der Annäherung an das Ideal eines steifen Stabes.

Es konnte dem gegenüber gezeigt werden, dass extrem schlanke, biegeeweiche Stäbe mit eingepprägter Vorverformung in der vernakulären Architektur verschiedener Kulturkreise auf uns überkommen sind. Bevorzugt handelt es sich hierbei um Konstruktionen aus Bambus- oder

Kapitel 10

²⁵ Siehe: Le Ricolais: *Tôles Composées*, 1935

²⁶ Siehe: Schock: *Seilverspannte Druckstäbe*, 1976

²⁷ Siehe: Kloth: *Leichtbaufibel*, 1947

Schilfrohr, das in ausreichenden Längen bei hoher Elastizität vorgefunden wird. Das Tragverhalten geht einher mit sichtbaren Verformungen, die aber die Gebrauchstauglichkeit in ihrem soziokulturellen Kontext nicht mindern. Das spontane Stabilitätsversagen ohne Ankündigung durch wahrnehmbare Verformungen ist hier einem biegeweichen Versagen gewichen, das sich durch zunehmende Verformungen charakterisiert.

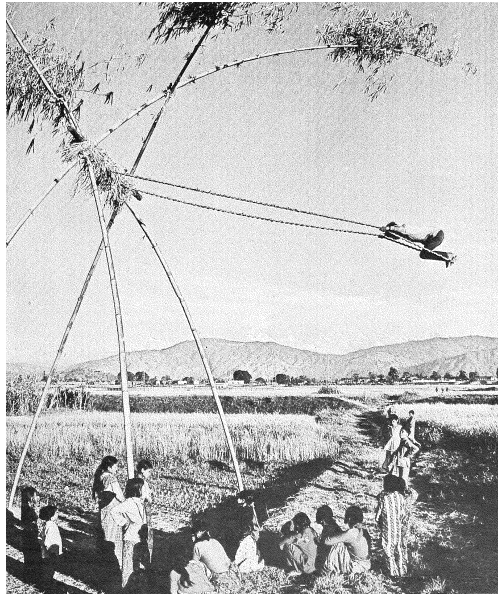


Abb. XIII. 10: Kinderschaukel aus biegsamen Bambusrohren, IL 31 aus Kapitel 10

Im technischen Bereich ist der Pfeilbogen als Kriegs- und Jagdwaffe eine der frühesten Adaptionen des elastischen Stabes mit eingprägter Vorverformung, der erst im Zusammenspiel mit der abgestimmten Elastizität des Pfeiles, als Stab-Projektil, zur effizienten Waffe wird. Hier ist funktional eine Verschiebung zur Feder zu beobachten, wie sie als Biegefeder in Sportgeräten des Stabhochsprungs oder im Maschinenbau weiterhin zur Anwendung kommen.

Kapitel 10.1

Die in den Naturwerkstoffen Bambus oder Schilfrohr angelegte Schlankheit und Elastizität ist bei synthetischen Stäben aus faserbewehrten Kunststoffen oder Holzwerkstoffen deutlicher ausgeprägt.

Seit Mitte des 20. Jahrhunderts werden von verschiedenen Architekten und Ingenieuren, inspiriert von vernakulären Architekturen oder beispielhaft von den Leichtbaustrukturen eines Buckminster Fullers, Bauweisen mit federnden, vorverformten Stäbe erprobt und weiterentwickelt. Frei Otto (1925-2015) hat in seiner *IL Reihe Aufgaben*²⁸ bereits Anwendungsfelder für stabbasierte Konstruktionen identi-

Kapitel 10.2

²⁸ Siehe: Otto: *IL 20 Aufgaben*, 1979, S. 49, 50, 51 u. 90

ziert, die nach Meinung des Verfassers ggf. vom federnden Tragverhalten der biegeweichen Stäbe profitieren könnten. Genannt seien hier beispielhaft Leichtbaumaste für Zeltkonstruktionen, die in diesem Sinne als tragende Federn zur Vorspannung der Zeltmembran ausgebildet werden könnten.

13.1.5 Aus dem Abschnitt Explikat

Der unscharfe *terminus technicus* »Stab« wurde im Abschnitt »Einleitung und Fragestellung« als *Explikandum* zum Ausgangspunkt genommen und in dem Abschnitt »Grundlagen« in den allgemeinen Aspekten Bedeutung, Vorkommen und Theoriebildung analysiert und in seiner *Begriffsintension* im Kontext des Bauwesens dargestellt.

Der Begriff ist danach weder *univok* noch *äquivok*. Dennoch ist seine *Begriffsextension* so zu bewerten, dass die extrem schlanken Stäbe mit eingepprägter Vorverformung hiervon zurzeit nicht mit eingeschlossen werden. Bei Büttner & Hampe findet man dann auch, trotz abgebildeter Beispielbauten, keine passende Kategorie in ihrer eigenen Systematik.

Kapitel 11

Zu Begriffsintension:

Auch Begriffsinhalt genannt. „[...] ist die Summe der Begriffsmerkmale, die ein Gegenstand aufweisen muss, um unter den Begriffsinhalt zu fallen“ Hügli/Lübcke: Philosophielexikon, 2003, S. 84

Zu Begriffsextension:

Auch Begriffsumfang genannt. „[...] ist die Menge der Gegenstände, die faktisch unter den Begriff fallen.“ Hügli/Lübcke: Philosophielexikon, 2003, S. 84

Zu univok:

Sub. Univozität. Wenn ein Wort in unterschiedlichen Kontexten in identischer Bedeutung Verwendung findet; es ist somit immer eindeutig. Siehe: Hügli/Lübcke: Philosophielexikon, 2003, S. 640

Zu äquivok:

Sub. Äquivozität. Wenn ein Wort in unterschiedlichen Kontexten in abweichender Bedeutung Verwendung findet; es ist somit eindeutig mehrdeutig. Siehe: Hügli/Lübcke: Philosophielexikon, 2003, S. 640

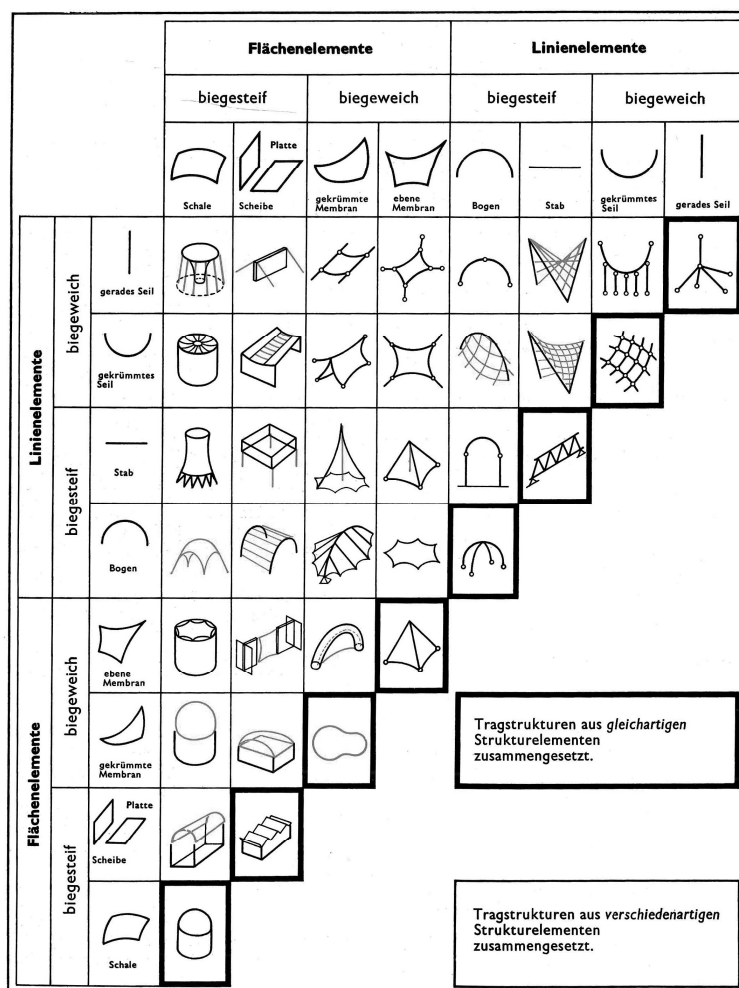


Abb. XIII. 11: Kombinatorik von Tragstrukturelementen, Büttner & Hampe aus Kapitel 4

Es wird daher die Bezeichnung *stabförmig* bzw. *Stabförmigkeit* als *Explikat* eingeführt, da dieser Begriff eine hohe assoziative Verbindung sowohl zu den konventionellen steifen Stäben, als auch zu den komplementären biegeweichen Stäben herstellt. Der Wortlaut steht aber in einem ausreichenden Kontrast zum etablierten *terminus technicus* »Stab«, sodass im fachsprachlichen Gebrauch eine hinreichende Distinktion vorliegt und ein umfassenderer Vorstellungsraum mit dem Explikat aufgespannt wird, der jetzt auch komplementäre Tragwerkselement bzw. Tragstrukturelemente einschließt.

Das produktive Potential des Explikats sollte durch seine synthetische Anwendung zur Entwicklung eines stabförmigen Tragstrukturelementes überprüft werden. Unter Vorgabe einer Schlankheit von $\lambda \approx 500$ und zulässigen Verformungen wurde ein generisches Modell eines Hybriden entwickelt, der sich aus einem elastisch gekrümmten Stab und einer Sehne zusammensetzt. Das Trag- und Verformungsverhalten konnte auf theoretischer Ebene als vorgespannte, nichtlineare Translationsfeder mit der Wirkungslinie in der gespannten Sehne beschrieben werden. Aufgrund dieser Eigenschaften wurden mögliche Anwendungsfelder in Randbereichen des Leichtbaus und der adaptiven Tragwerke aufgezeigt.

In einem zweiten Schritt wurde das generische in ein physisches, kleinmaßstäbliches Modell aus Stahlpräzisionsrohr und Stahldrahtsehne überführt und sein Trag- und Verformungsverhalten in Tastversuchen beprobt.

Dabei konnte eine grundsätzliche Übereinstimmung der theoretischen und empirischen Ergebnisse festgestellt werden. Es stellt sich ein sogenannter *Arbeitsbereich* von nutzbaren Gleichgewichtszuständen ein, in dessen Grenzen der stabförmige Hybrid äußere Druckkräfte aufnehmen kann, die unterhalb der Sehnenzugkraft des jeweiligen Gleichgewichtszustandes vor der Belastung liegen. Die Tragqualität dieses Demonstrators geht einher mit sichtbaren Verschiebungen, bedingt durch Verformungen an der Grenze der Elastizität zur Plastizität des Materials; das spezifische, elastische Verhalten kann aber durch die Wahl eines günstigen Verhältnisses der Biegezugfestigkeit und des E-Moduls des elastisch gekrümmten Stabes günstig beeinflusst werden.

13.2 Fazit

Die Methode des Explizierens nach Rudolf Carnap konnte auf den betrachteten Begriff *Stab* erfolgreich angewendet werden, wenn auch aus naturwissenschaftlichen Gesichtspunkten eine Abgrenzung gegenüber den metaphysischen Bereichen des assoziativen Raumes (z.B. Zauberstab, Zepter etc.) notwendig erschien. Dem gegenüber herrscht keine Gewissheit darüber, dass beim begrenzten Umfang dieser Arbeit eine Vollständigkeit aller zielführenden Perspektiven erreicht wurde. Die hier eingenommenen Perspektiven erschlossen aber bereits ein Spektrum an Aspekten, die in ihren Aussagen sehr ergiebig sind und vom Bereich der primären und sekundären Ergebnisse bis in den des Ausblicks führen.

Das Explizieren erwies sich als Methode, die die unterschiedlichen Argumentationsräume, der naturwissenschaftlichen und geisteswissenschaftlichen Disziplinen verbinden kann. Die konstatierte Unschärfe der Definition *Stab* durch seine kontextbezogene Verwendung relativiert – wurde nicht als Malus herausgestellt, sondern zur Hypothese über seine latente Vielschichtigkeit entwickelt.

Eine Empfehlung für die Anwendung dieser Methode im Bauwesen kann insoweit ausgesprochen werden, als dass es sich hierbei um einen verwissenschaftlichten Bereich handelt, der u.a. auf Innovationen aus angrenzenden Disziplinen angewiesen ist, die durch produktive Begriffserweiterung einfacher erkannt und implementiert werden können. Andererseits ist das Explizieren ein methodischer Ansatz, um allgemein bautechnikgeschichtliche Entwicklungen umfassender analysieren und bewerten zu können, da auch latente Interdependenzen von Objekt und Theorie disziplinübergreifend erschlossen werden.

Das Explikat *Stabförmigkeit/stabförmig* ist in seiner Wortwahl vertraut und dennoch gegenüber dem tradierten Begriff *Stab* im Kontext der Fachsprache des Bauwesens ausreichend irritierend, um auf einen erweiterten Begriffsinhalt zu verweisen. Dieser Begriffsinhalt ist nicht konventionell definitorisch eng gefasst und soll gerade in seiner weiten Auslegung zu neuen Tragwerksstrukturen inspirieren.

Mit den generisch entwickelten stabförmigen Hybriden und seinem Demonstrator T05 ist es gelungen, ein von den Eulerstäben abweichendes Tragverhalten aus bekannten Elementen zu entwickeln. Das Trag- und Verformungsverhalten als Druckstab wurde in ersten Näherungen – zum verwandten Pfeilbogen ergänzend – beschrieben.

Das dünnwandige, kreisrunde Hohlprofil ist in dieser Anwendung ein günstiger Querschnitt im Sinne des Formleichtbaus, da die Gestaltform der gekrümmten Kreiszyinderschale einem lokalen Beulen entgegenwirkt. Die Biegefigur in einer Ebene erfordert eigentlich

einfach symmetrische Querschnitte, die sich mit ihren geraden Stegen aber nur durch zusätzliche Versteifungen im Formleichtbau realisieren ließen. Es handelt sich in dieser Phase um erste Grundlagen, die bei einer anwendungsbezogenen Fragestellung um weitere Aspekte, wie z.B. das Ermüdungsverhalten, vertieft werden müssen.

Erste Anwendungen konnten für den Hybriden in den Bereichen des Leichtbaus und des *Active Bending* identifiziert werden, wo kleine Kräfte über große Distanzen geleitet werden und ausgeprägte Verformungen zulässig sind.

Die von Carnap geforderte *Fruchtbarkeit* des Explikats, konnte anhand der modellhaften Entwicklung eines Hybriden und seiner empirischen Bewertung belegt werden.

13.2.1 Sekundäre Ergebnisse

Das methodische Vorgehen zur Ergründung der Ursprünge und Entwicklungslinien von hohlen Stäben aus Eisenwerkstoffen bedingte neben der chronologischen Ordnung auch eine kategorische, die in dieser Form fächerübergreifend noch nicht bautechnikgeschichtlich erfolgt ist. Der Ursprung des synthetischen Rohres als Gefäß, seine Umwidmung zum Tragwerkselement und die aufgezeigten Entwicklungsschritte – bedingt durch das Aufkommen neuer Eisenwerkstoffe und deren Formgebungsverfahren bzw. Fügungen – ergibt ein offenes Ordnungssystem für noch unbekannte, historische Röhrenkonstruktionen und deren Technologien; genauso wie sich auch der Innovationsanspruch zukünftiger Hohlprofilkonstruktionen hieran messen lässt.

Den historischen Fügungen vor Einführung der Schweißtechnik wurde besondere Aufmerksamkeit zuteil, da hier gezeigt werden konnte, dass die tektonische Fügung der ersten Generation von Gussstützen noch nicht von den kraftschlüssigen, lösbaren Flanschen- oder Schraubmuffen-Verbindungen aus dem Leitungsbau profitierte.

Diese objektbezogenen Betrachtungen wurden durch eine theoriebezogene begleitet. Es konnten so Zusammenhänge aufgezeigt werden, die zur Dominanz der geraden, steifen Euler-Stäbe im konstruktiven Ingenieurbau führten und welche Optimierungsstrategien hierzu beitrugen.

Die Schlankheit ist als quantitativer Begriff von zentraler Bedeutung. Es konnte verdeutlicht werden, wie sich die Vorstellungen hierzu sprunghaft mit Eulers Erkenntnissen entwickelten aber erst relativ spät Teil von konsistenten Bemessungsansätzen wurde.

In diesem Zusammenhang ist der Nachweis der Persistenz des unzureichenden Ansatzes Hodgkinsons herauszustellen. Sein experi-

menteller Ansatz steht stellvertretend für ein zeitgenössisches Unbehagen gegenüber theoretischen Erkenntnissen in Konfrontation zur Empirie, deren Ergebnisse höhere Aussagekraft zu besitzen schien. War dieses Unbehagen noch vor der Hochzeit der Aufklärung, im Prolog der Mathematiker zum Gutachten über die Kuppel des St. Petersdoms demütig thematisiert wurden, so erstaunt der späte Zeitpunkt seines Standpunktes und noch viel mehr seine Wirkmächtigkeit über Love bis Barré ins letzte Viertel des 19. Jahrhunderts.

13.3 Ausblick

Die primären Ergebnisse über den Hybriden und seine möglichen Anwendungsgebiete bilden erste Grundlagen ab, die auf weiterführende Fragen verweisen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht beantwortet werden konnten:

- Mit welchem mechanischen Modell ist die Sehnenzugkraftzunahme $\Delta \approx 3,1 \text{ N}$ bei steigendem Stich aus Kapitel 12.3.2 erklärbar und warum konnte die Sehnenkraft größere Werte als N_k annehmen?
- Ist die Eignung von dünnwandigen, kreisrunden Hohlprofilen durch den vermuteten, höheren *effektiven E-Modul* (Gl. X. 8) aus Kapitel 10.4 nachweisbar?
- Welchen Einfluss hat die Dehnsteifigkeit der Sehne?
- Wie ist das Ermüdungsverhalten bei häufigen Lastwechseln mit einhergehenden großen Verformungen zu bewerten?
- Welche Anwendungen sind realistisch und welchem Bemessungsansatz folgen sie?

Aus dem Spektrum der sekundären Ergebnisse leiten sich Fragestellungen ab, die dem Bereich der Bautechnikgeschichte zugeordnet werden können.

Die hohlen Stäbe aus Eisenwerkstoffen fanden in der Frühphase der industriellen Revolution ihre erste Verbreitung. Die folgende Weiterentwicklung fiel in eine Epoche, die sich am Übergang von der Erfinderpersönlichkeit zum Ingenieur befand und durch einen hohen experimentellen Ansatz charakterisiert werden kann, der lokale, ephemere Konstruktionen hervorbrachte, die sich weder in der Breite durchsetzen konnten noch gut dokumentiert sind. Es werden daher noch zahlreiche Singularitäten von Röhrenkonstruktionen und ihren Verbindungsdetails vermutet, die noch nicht erfasst und erforscht sind, so wie sie in den Bereichen Fördergerüste oder Stahlschornsteine beispielhaft vermutet werden. Dieser Aspekt geht einher mit der vollständigen Abbildung und Bewertung der historischen Bemessungsverfahren für hohle Stäbe aus Eisenwerkstoffen, die für ihre Frühzeit unvollständig zu sein scheint.

Abbildungsverzeichnis Kapitel 13:

- Abb. XIII. 1: Abstraktionsstufenmodell des Stabes im Bauwesen aus Kapitel 3. Aus: Verfasser.
- Abb. XIII. 2: Fig. 13 zeigt eine Säule der Länge AB mit vermutlich quadratischem Querschnitt und generischem Gewicht P aus Kapitel 5. Aus: Euler, Leonhard: *Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes, sive solutio problematis isoperimetrici latissimo sensu accepti*, Lausanne, Genf, E065, 1744, Tafel IV
- Abb. XIII. 3: Rohrthürme [sic] der Fa. Mannesmann aus nahtlosem Stahlrohr, unrealisiert vermut. 1892 aus Kapitel 8. Aus: Mannesmann-Archiv, Faksimile aus Sammlung Burkhardt
- Abb. XIII. 4: Oben Muffenrohr Schloss Dillenburg 1455, unten Flanschenrohr Schloss Versailles 1686 aus Kapitel 7. Aus: Tietze, Karl Albert: Vom Blasrohr bis zur Continental-Pipeline. In: *Frontinus*. Heft III, 1979, S. 23
- Abb. XIII. 5: Erhaltener Querschnitt der Tragröhre mit Diaphragma von Isambard Kingdom Brunel, 1852 aus Kapitel 7. Aus: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Surviving_girder_section,_Chepstow_railway_bridge.jpg Description: Surviving section of one of the horizontal girders of Chepstow Railway Bridge, now preserved outside the offices of the adjacent Mabey bridge works. Date 10 March 2012, Source Own work, Author Andy Dingley
- Abb. XIII. 6: Vergleich von Kragträgern gleicher Masse und Länge bei Galilei mit $F_E \gg F_N$, 1638, aus Kapitel 8. Aus: Galilei, Galileo: *Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove sci-enze, attenenti alla meccanica & i movimenti locali*, Elzevier. Leiden, 1638, Aus-gabe ETH-Bibliothek Zürich Shelf Mark: Rar 5498 Persistent Link: <http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-3923>, S. 147
- Abb. XIII. 7: Standardknoten Wachsmann, 1950er aus Kapitel 8. Aus: Wachsmann, Konrad: *Wendepunkt im Bauen*, Krausskopf-Verl., Wiesbaden, 1959, S. 171
- Abb. XIII. 8: Analogievorbild Querschnitt durch einen Strohhalm, Fritz Leonhardt 1940 aus Kapitel 9. Aus: Leonhardt, Fritz: *Leichtbau – eine Forderung unserer Zeit. Anregungen für den Hoch- und Brückenbau*, In: *Die Bautechnik : Fachschrift für das gesamte Bauingenieurwesen*, Jg. 18, Heft 36-37, S. 413-423, 1940, S. 413
- Abb. XIII. 9: *Eléments Tubulaires ISOFLEX*, Le Ricolais 1930er Jahre aus Kapitel 9. Aus: N. N.: *Things Themselves Are Lying, And So Are Their Images : Interviews with Robert Le Ricolais*, S. 81-109, In: *Structures Implicit and Explicit*, Hrsg. Bryan, James und Rolf Sauer, Graduate School of Fine Arts, University of Pennsylvania, Wittenborn & Company, Philadelphia, 1973, S. 100
- Abb. XIII. 10: Kinderschaukel aus biegsamen Bambusrohren, IL 31 aus Kapitel 10. Aus: Hrsg. Otto, Frei: *IL 31 Bambus Bamboo : Bambus als Baustoff : Bauen mit pflanzlichen Stäben*. (Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, Nr. 31, 1985, S. 9
- Abb. XIII. 11: Kombinatorik von Tragstrukturelementen, Büttner & Hampe aus Kapitel 4. Aus: Büttner, Oskar u. Hampe, Erhard: *Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur: Klassifizierung-Tragqualität-Bauwerksbeispiele*, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften, Berlin, 1985, S. 18

Bibliographie

- Ashby: **Materials Selection**, 2011 | Ashby, Michael, F.: *Materials Selection in Mechanical Design*. 4. Aufl., Butterworth-Heinemann, Burlington USA, 2011
- Ashby: **Materials, Bicycles, and Design**, 1995 | Ashby, Michael F.: *Materials, Bicycles, and Design : The 1994 Edward DeMille Campbell Memorial Lecture* ASM International. In: *Metallurgical and Materials Transactions B*. S. 1101-1108, Vol. 26B, Dezember, 1995
- Bach: **Gittermasten**, 1990 | Bach, Klaus: *Gittermasten amerikanischer und russischer Schlachtschiffe*. In: Rainer Graefe; Murat Gappoev u. Ottmar Pertschi Hrsg.: *Vladimir G. Šuchov. 1853-1939 : Die Kunst der sparsamen Konstruktion*. S. 104ff, Deutsche Verl.-Anst., Stuttgart, 1990
- Baiasubramaniam: **Delhi iron Pillar**, 2004 | Baiasubramaniam, R.: *Delhi iron Pillar*. In: *II Metal News*. Vol. 7, N° 2 April 2004, S. 11-13 und *II Metal News* Vol. 7, N° 3, Juni, 2004
- Bannister: **The First Iron-Framed Buildings**, 1950 | Bannister, Turpin: *The First Iron-Framed Buildings*. In: *The Architectural Review*. Vol. 107, N° 639, S. 241, März, 1950
- Bargmann: **Historische Bautabellen**, 2013 | Bargmann, Horst: *Historische Bautabellen : Normen und Konstruktionshinweise 1870-1960*. 5. Aufl., Werner Verl., Köln, 2013
- Barré: **Résistance des colonnes**, 1870 | Barré, L. A.: *Résistance des Colonnes en Fonte*. In: *Revue générale de l'architecture et des travaux publics : journal des architectes, des ingenieurs, des archéologues, des entrepreneurs, des industriels du bâtiment, etc.* Bd. 28, Paris, 1870/71
- Becker: **Brückenbau**, 1858 | Becker, M.: *Der Brückenbau in seinem ganzen Umfange*. Bd. 2 des *Handbuches der Ingenieurwissenschaften*. Zweite verm. und verbess. Aufl., Verlagsbuchhandlung Carl Macken, Stuttgart, 1858
- Beech/Farnfield et al.: **Textile Terms**, 1986 | Beech, S. R.; C. A. Farnfield; P. Whorton u. J. A. Wilkins: *Textile Terms and Definitions*. The Textile Institute, Manchester, 1986
- Bell: **Tetrahedral Principle**, 1903 | Bell, Graham Alexander: *The Tetrahedral Principle in Kite Structure*. In: *National Geographic*. Vol. XIV, N° 6, Juni, S. 218-251, 1903
- Betschart: **Gusskonstruktionen**, 1985 | Betschart, Anton-Peter: *Neue Gusskonstruktionen in der Architektur*. Giessen + Bauen 1. Hrsg.: *Entwicklungsinstitut für Giesserei- u. Bautechnik*, 1985
- Blossfeldt: **Urformen der Kunst**, 1929 | Blossfeldt, Karl: *Urformen der Kunst : Photographische Pflanzenbilder*. Wasmuth, Berlin, 1929
- Bousse: **Die Fabrikation nahtloser Stahlrohre**, 1908 | Bousse, Anton: *Die Fabrikation nahtloser Stahlrohre : mit einer Einleitung über die Fabrikation geschweißter Eisenrohre*. In: *Bibliothek der gesamten Technik*. Bd. 27, Hrsg. Max Jänecke, Verlagsbuchhandlung Hannover, 1908
- Boyken: **Gestaltetes Eisen**, 1988 | Boyken, Immo: *Gestaltetes Eisen : Aussichtstürme in Südwest-Deutschland und in der nördlichen Schweiz im späten 19. Und beginnenden 20. Jahrhundert*. In: *Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke : Bauefuge, Konstruktion, Werkstoffe*. Jahrbuch 1987, Sonderforschungsbereich 315, Hrg. Fritz Wenzel, Ernst & Sohn, Berlin, 1988
- Boyken: **Vorgefertigte Aussichtstürme**, 1991 | Boyken, Immo: *Zum Versand vorgefertigte Aussichtstürme aus Dresden – Bemerkungen zur Architektur von Eisenkonstruktionen*. In: *Vom Holz zum Eisen : Weitgespannte Konstruktionen des 18. Und 19. Jahrhunderts*. Deutsch-sowjetisches Kolloquium des Mittel-, Südost-, Osteuropa-Referats des Instituts für Auslandsbeziehungen, Stuttgart und des Teilprojekts C3 „Geschichte des Konstruierens“ im Sonderforschungsbereich 230 „Natürliche Konstruktionen“ am 25. Und 26. Januar 1990 am Institut Für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, Tübingen, SFB 230, S. 135-150, 1991
- Brensing: **Herstellungsverfahren**, o.J. | Brensing, Karl-Heinz u. Baldur Sommer: *Herstellungsverfahren für Stahlrohre*, Mannesmannröhren-Werke AG, o.J.
- Burkhardt: **Eiserne Rohrkonstruktionen**, 1991 | Burkhardt, Berthold: *Eiserne Rohrkonstruktionen im 19. Jahrhundert*. In: *Vom Holz zum Eisen : Weitgespannte Konstruktionen des 18. Und 19. Jahrhunderts*. Deutsch-sowjetisches Kolloquium des Mittel-, Südost-, Osteuropa-Referats des Instituts für Auslandsbeziehungen, Stuttgart und des Teilprojekts C3 „Geschichte des Konstruierens“ im Sonderforschungsbereich 230 „Natürliche Konstruktionen“ am 25. Und 26. Januar 1990 am Institut Für Leichte Flächentragwerke, Universität Stuttgart, Tübingen, SFB 230, S. 135-150, 1991

- Burkhardt: Zeltarchitektur, 1986 | Burkhardt, Berthold: Zur Geschichte der Zeltarchitektur. In: Zelte: Eine Ausstellung im Architekturmuseum vom 23. August bis 12. Oktober 1986. Hrsg.: Architekturmuseum Basel, 1986
- Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 1, 1977 | Büttner, Oskar u. Erhard Hampe: Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur : Bd. 1. Gerd Hatje, Stuttgart, 1977
- Büttner/Hampe: Tragstruktur, Bd. 2, 1985 | Büttner, Oskar u. Erhard Hampe: Bauwerk : Tragwerk : Tragstruktur : Tragstruktur: Klassifizierung-Tragqualität-Bauwerksbeispiele : Bd. 2. Ernst & Sohn, Stuttgart, 1985
- Carnap: Induktive Logik, 1959 | Carnap, Rudolf: Induktive Logik und Wahrscheinlichkeit. Springer-Verl., Wien, 1959
- Culmann: Eiserne Brücken, 1852 | Culmann, K.: Der Bau der eisernen Brücken in England und Amerika. In: Allgemeine Bauzeitung. S. 193-222, Hrsg. L. Förster, 17. Jg., 1852
- Dankert/Dankert: Technische Mechanik, 2013 | Dankert, Jürgen u. Helga Dankert: Technische Mechanik : Statik, Festigkeitslehre, Kinematik/Kinetik. 7. erg. Aufl., Springer Vieweg, 2013
- De La Grange: Sur la Force des Ressorts Pliés, 1769 | De La Grange: Sur la Force des Ressorts Pliés. In: Histoire de l'Academie Royale des Sciences et des Belles Lettres. S. 167-203, Berlin, 1769
- Diderot/d'Alembert: Encyclopédie, Bd. 1, 1751 | Diderot, Denis u. Jean Baptiste le Rond d'Alembert: Encyclopédie ou Dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des métiers. Bd. 1, Paris, 1751
- Dinkler: Grundlagen der Baustatik, 2012 | Dinkler, Dieter: Grundlagen der Baustatik : Modelle und Berechnungsmethoden für ebene Stabtragwerke. 2. Aufl., Springer Vieweg, Wiesbaden, 2012
- Dudenreaktion: Das Herkunftswörterbuch, 2007 | Dudenredaktion: Duden : Das Herkunftswörterbuch : Etymologie der deutschen Sprache : Duden Bd. 7., 4. Neu bearb. Aufl., Dudenverlag Mannheim, 2007
- Dudenredaktion: Das Bedeutungswörterbuch, 2010 | Dudenredaktion; Duden : Das Bedeutungswörterbuch : Duden Bd. 10., 4. Neu bearb. u. erw. Aufl., Dudenverlag, Mannheim, 2010
- Duhem: Études sur Léonardo de Vinci, 1906 | Duhem, Pierre: Étude sur Léonardo de Vinci : Ceux qu'il a lus et ceux qui l'ont lu. Librairie Scientifique. Hermann, Paris, 1906
- Dutta: Hohlprofil-Konstruktionen, 1999 | Dutta, Dipak: Hohlprofil-Konstruktionen. Ernst & Sohn, Berlin, 1999
- Echterhoff: Rohre für Freileitungsmaste, 1940 | Echterhoff, E.: Verwendung von Rohren für Freileitungsmaste. In: Der Deutsche Baumeister : Zeitschrift der Fachgruppe Bauwesen e.V. im NS-Bund Deutscher Technik und Mitteilungen des Generalbevollmächtigten für die Regelung der Bauwirtschaft. S. 37-38 2. Jg., Mai, Berlin, 1940
- Ellis: Benjamin Thompson, 1871 | Ellis, George E.: Memoir of Sir Benjamin Thompson, Count Rumford, with notices of his Daughter. Published in connection with an edition of Rumford's complete works. American Academy of Arts and Sciences, Boston, 1871
- Engel: Tragsysteme, 1967 | Engel, Heino: Tragsysteme : Structure systems. Deutsche Verlanst., Stuttgart, 1967
- Euler: force des colonnes, E238, 1757 | Euler, Leonard: Sur la force des colonnes. S. 252-282. In: Histoire de l'Académie Royale des Sciences et des Belles-Lettres de Berlin. E238, 1757
- Euler: lineas curvas, E065, 1744 | Euler, Leonhard: Methodus inveniendi lineas curvas maximi minimive proprietate gaudentes, sive solutio problematis isoperimetrici latissimomo sensu accepti. Lausanne, Genf, E065, 1744
- Eyth: Ennobucht, 1957 | Eyth, Maximilian, Eduard, Friedrich: Die Brücke über die Ennobucht. Reclam, Stuttgart, 1957
- Fairbairn: Construction of Tubular Bridges, 1849 | Fairbairn, William: An Account of the construction of the Britannia and Conway Tubular Bridges with a complete history of their progress. London, 1849
- Faustus: MACHINÆ NOVÆ, 1617 | Verantius, Faustus: MACHINÆ NOVÆ FAUSTI VERANTII SICENI CUM DECLARATIONE LATINA; ITALICA; HISPANICA; GALLICA ET GERMANICA; VENETIIS CUM PRIVILEGIIS. 1617
- Fontane: Die Brück' am Tay, 1905 | Fontane, Theodor: Die Brück' am Tay. In: Gedichte. S. 202-204, J. G. Cotta'sche Buchhandlung Nachfolger Stuttgart und Berlin, 10. Aufl., 1905
- Föppl: Fachwerk im Raume, 1892 | Föppl, August: Das Fachwerk im Raume. Teubner, Leipzig, 1892
- Fröhlich: Sonderkonstruktionen mit Rohren, 1959 | Fröhlich, J.: Sonderkonstruktionen mit Rohren. In: Konstruieren in Stahlrohr. Tagungsband, Hrsg. Deutscher Stahlverband, Beratungsstelle für Stahlanwendung und VDI-Fachgruppe Konstruktion, Vulkan-Verlag, Essen, 1959

- Gabjewski/Gottschalk: *Viaduc de Crumlin, 1857* | Gabjewski u. Gottschalk: Notice sur le Viaduc de Crumlin. In: Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils. Vol 10, S. 192-204 + Pl. 69, Paris, 1857
- Galilei: *Discorsi*, 1638 | Galilei, Galileo: Discorsi e dimostrazioni matematiche, intorno à due nuove scienze attenenti alla meccanica & i movimenti locali, Elsevier. Leiden, 1638, Ausgabe ETH-Bibliothek Zürich Shelf Mark: Rar 5498 Persistent Link: <http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-3923>
- Gaus: *Die Urhütte*, 1971 | Gaus, Joachim: Die Urhütte : Über ein Modell in der Baukunst und ein Motiv in der Bildenen Kunst. In: Wallraf-Richartz-Jahrbuch. Bd. 33, S. 7-70, 1971
- Gengnagel: *Active Bending*, 2013 | Gengnagel, Christoph: Foreword. In: International Journal of Space Structures. Vol. 28, No. 3&4, 2013
- Graefe/Gappoev et al.: *Šuchov*, 1990 | Graefe, Rainer; Murat Gappoev u. Ottmar Pertschi, Hrsg.: Vladimir G. Šuchov 1853-1939 : Die Kunst der sparsamen Konstruktion. Deutsche Verl.-Anst., Stuttgart, 1990
- Grimm/Grimm: *Deutsches Wörterbuch*, Bd. 10, 1984 | Deutsches Wörterbuch / von Jacob u. Wilhelm Grimm; Nachdr.: München, Deutscher Taschenbuch Verl. 1984; NE: Grimm, Jacob [Mitverf.]; Grimm, Wilhelm [Mitverf.]; GT; Bd. 17 = Bd.10, Abt. 2, Teil 1. Sprecher-Stehuhr/bearb. von Moritz Heyne - Fotomechan. Nachdr. d. Erstausgabe. 1919.-1984; NE: Heyne, Moritz [Mitverf.]
- Hatzfeld: *Anfang der Deutschen Röhrenindustrie*, 1960 | Hatzfeld, Lutz: Der Anfang der Deutschen Röhrenindustrie : Zur 100. Wiederkehr der Verlegung der Poensgen-Betriebe von Mauel nach Düsseldorf. In: Tradition : Zeitschrift für Firmengeschichte und Unternehmerbiographie. Bd. 6, 1960
- Heinzerling/Intze: *Normalprofil-Buch Walzeisen*, 1880 | Hrsg. Heinzerling, Friedrich u. Otto Intze: Deutsches Normalprofil-Buch für Walzeisen zu Bau- und Schiffbau-Zwecken. Toeche, Berlin, 1880
- Heinzerling/Intze: *Normalprofil-Buch Walzeisen*, 1897 | Hrsg. Heinzerling, Friedrich u. Otto Intze: Deutsches Normalprofil-Buch für Walzeisen zu Bau- und Schiffbau-Zwecken. La Ruelle, Aachen, 1897
- Heinzerling: *Brücken in Eisen*, 1870 | Heinzerling, F.: Die Brücken in Eisen. zweiter Bd., 4. Abt. von: Die Schule der Baukunst. Otto Spamer, Leipzig, 1870
- Heinzerling: *Brückenbauten*, 1868/69 | Heinzerling, F.: Historische Uebersicht über die Anwendung des Eisens zu Brückenbauten und deren Ergebnisse für die Wahl ihres Konstruktionssystems und Eisenmaterials. In: Allgemeine Bauzeitung. 1868/69
- Heller: *Padia 1*, 1998 | Heller, Hanfried: *Padia 1 : Grundlagen Tragwerkslehre*. Ernst & Sohn, 1998
- Helmerich: *Alte Stähle*, 2005 | Helmerich, Rosemarie: Forschungsbericht 271: Alte Stähle und Stahlkonstruktionen : Materialuntersuchungen, Ermüdungsversuche an originalen Brückenträgern und Messungen von 1990 bis 2003. Hrsg.: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Wirtschaftsverl. NW Verl. für neue Wissenschaft, Bremerhaven, 2005
- Hevelius: *machinae coelestis*, 1673 | Hevelius, Johannes: Johannis Hevelii machinae coelestis pars prior; organographiam, sive instrumentorum astronomicorum omnium, quibus Auctor hactenus Sidera rimatus, ac dimensus est, accuratam delineationem, et descriptionem, plurimis iconibus, aeri incis, illustratam & exornatam, exhibens: cum aliis quibusdam, tam jucundis, quàm scitu dignis, ad mechanicam, opticamque artem pertinentibus Gedani, 1673, ETH-Bibliothek Zürich, Shelf Mark: Rar 9646 GF, Persistent Link: <http://dx.doi.org/10.3931/e-rara-557>, 1673
- Hodgkinson: *Forms of Iron Beams*, 1831 Hodgkinson, Eaton: Theoretical and experimental researches to ascertain the Strength and best Forms of Iron Beams. In: Memories of the Literary and Philosophical Society of Manchester. Second Series, Vol. V, gelesen 1830, London, 1831
- Hodgkinson: *Strength of Pillars*, 1840 | Hodgkinson, Eaton: Experimental Researches on the Strength of Pillars of Cast Iron, and Other Materials. In: Philosophical Transactions Royal Society London 1840. S. 385-456, publi. 1. Januar, 1840
- Hooke: *De Potentia Restitutiva*, 1678 | Hooke, Robert: De Potentia Restitutiva, or of Spring Explaining the Power of Springing Bodies. London, 1678
- Hudert: *Timberfabric*, 2013 | Hudert, Markus: Timberfabric – Applying Textile Assembly Principles for Wood Constructions in Architecture. Thèse N° 5553 (2013), La Faculté de l'Environnement Naturel, Architectural et Construit Laboratoire de Construction en Bois, École Polytechnique Fédéral de Lausanne, 2013
- Hügli/Lübcke: *Philosophielexikon*, 2003 | Hügli, Anton u. Poul Lübcke Hrsg.: Philosophielexikon : Personen und Begriffe der abendländischen Philosophie von der Antike bis zur Gegenwart. 5. Aufl. rowohlt's enzyklopädie, Rowohlt Taschenbub Verl., 2003

- Jamm: **Stahlrohr als Konstruktionselement**, 1959 | Jamm, W.: Das Stahlrohr als Konstruktionselement. In: Konstruieren in Stahlrohr. S. 3-8, Tagungsbd., Hrsg. Deutscher Stahlverband, Beratungsstelle für Stahlanwendung und VDI-Fachgruppe Konstruktion, Vulkan-Verlag, Essen, 1959
- Käpplein/Wielgosch-Frey: **Historische Eisen- und Stahlkonstruktionen**, 2001 | Käpplein, Rudolf u. Andrea Wielgosch-Frey: Historische Eisen- und Stahlkonstruktionen: Untersuchen, Berechnen, Instandsetzen. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke : Empfehlungen für die Praxis. Hrsg. Fritz Wenzel; Joachim Kleinmanns, Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe, 2001
- Käpplein: **Aussichtsturm Büchenbronner Höhe**, 1988 | Käpplein, Rudolf: Der Aussichtsturm auf der Büchenbronner Höhe. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke : Bauefüge, Konstruktion, Werkstoffe. Jahrbuch 1987, Sonderforschungsbereich 315, Hrg. Fritz Wenzel, Ernst & Sohn, Berlin, 1988
- Kimpel/Suckale: **Gotische Architektur**, 1995 | Kimpel, Dieter u. Robert Suckale: Die gotische Architektur in Frankreich. 1130–1270. München, 1995
- Kindmann: **Stabilität und Theorie II. Ordnung**, 2008 | Kindmann, Rolf: Stahlbau, Teil 2: Stabilität und Theorie II. Ordnung. 4. Aufl., Ernst u. Sohn, Berlin, 2008
- Kinseher: **Der Bogen**, 2005 | Kinseher, Richard: Der Bogen in Kultur, Musik und Medizin, als Werkzeug und Waffe. BoD, ISBN 3-8311-4109-6, 2005
- Klasen: **Hochbau-Constructionen in Eisen**, 1876 | Klasen, Ludwig: Handbuch der Hochbau-Constructionen in Eisen und anderen Metallen für Architekten, Ingenieure, Constructeure, Bau-Handwerker und Technische Lehranstalten. Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1876, reprint, Edition libri rari Th. Schäfer, Hannover, 1981
- Kloth: **Leichtbaufigel**, 1947 | Kloth, W.: Leichtbaufigel : eine Anleitung zur Stahleinsparung im allgemeinen Maschinenbau. Verl. Hellmut Neureuter, München-Wolfratshausen, 1947
- Klotz: **Von der Urhütte zum Wolkenkratzer**, 1991 | Klotz, Heinrich: Von der Urhütte zum Wolkenkratzer : Geschichte der gebauten Umwelt. Prestel-Verl., München, 1991
- Köhler: **Merkblatt 224**, 1975 | Köhler, Albert: Rund-Hohlprofile für den Stahlbau. In: Merkblatt 224. Hrsg. Beratungsstelle für Stahlverwendung, 4. Aufl., Düsseldorf, 1975
- Königer: **Die Konstruktion in Eisen**, 1902 | Königer, Otto: Die Konstruktion in Eisen. Bd. III, 6. verm. u. umgearb. Aufl., Gebhardt's Verl., Leipzig, 1902, reprint, Edition libri rari Th. Schäfer, Hannover, Hrsg. G. U. Breymann: Allgemeine Baukonstruktionslehre mit besonderer Beziehung auf das Hochbauwesen : Ein Handbuch zu Vorlesung und zum Selbstunterricht. 4 Bde., 1993
- Kotelnikova-Weiler/Douth et al.: **Materials for Actively-Bent Structures**, 2013 | Kotelnikova-Weiler, N.; C. Douth et al.: Materials for Actively-Bent Structures. In: International Journal of Space Structures. S. 229-240, Vol. 28, No. 3&4, 2013
- Krätzig/Wittek: **Tragwerke 1**, 1990 | Krätzig, B. Wilfried u. Udo Wittek: Tragwerke 1 : Theorie und Berechnungsmethoden statisch bestimmter Stabtragwerke. Springer-Verlag, 1990
- Krausse: **Design-Strategie**, 1973 | Krausse, Joachim: Design-Strategie am Werk : Eine Einführung in die Planungs- und Entwurfsarbeit von Buckminster Fuller. S. 130-219, In: Bedienungsanleitung für das Raumschiff Erde und andere Schriften. Hrsg. Joachim Krausse, Ursula Bahn, Rowohlt Taschenbuch, Hamburg, 1973
- Kurrer: **Geschichte der Baustatik** 2003 | Kurrer, Karl-Eugen: Geschichte der Baustatik. korri, Nachdr., Ernst & Sohn, Berlin, 2003
- Lamberth: **Geschichte von Rohren und Rohrwerkstoffen**, 1986 | Lamberth, W.: Zur Geschichte von Rohren und Rohrwerkstoffen. In: Frontinus Heft X, 1986
- Le Ricolais: **Systèmes Réticules**, 1940 | Le Ricolais, Georges-Robert: Essai sur des Systèmes Réticules à 3 Dimensions. In: Annales des Ponts et Chaussées, Mémoires et Documents Relatifs à l'Art des Constructions et au Service de l'Ingénieur. 110 Jg., VII, Julie-August, S. 63-70, 1940
- Le Ricolais: **Tôles Composées**, 1935 | Le Ricolais, Georges-Robert: Les Tôles Composées et leur Applications aux Constructions Métalliques Légères. In: Mémoires de la Société des Ingénieurs Civils de France. Bulletin de Mai-Juin, S. 410-431, Paris, 1935
- Leicher: **Tragwerkslehre**, 2010 | Leicher, Gottfried: Tragwerkslehre in Beispielen und Zeichnungen. 3. Aufl., Werner Verl., Köln, 2010
- Leonhardt: **Leichtbau**, 1940 | Leonhardt, Fritz: Leichtbau – eine Forderung unserer Zeit. Anregungen für den Hoch- und Brückenbau. In: Die Bautechnik : Fachschrift für das gesamte Bauingenieurwesen. Jhg. 18, Heft 36-37, S. 413-423, 1940

- Leupold: *Theatrum Machinarum*, 1724 | Leupold, Jacob: *Theatrum Machinarvm Generale. Schau-Platz Des Grundes Mechanischer Wissenschaften. Das ist: Deutliche Anleitung Zur Mechanic oder Bewegungs-Kunst, Darinnen nicht nur Die Fünff einfachen Rüst-Zeuge und die dabey nöthigen Lehr-Sätze deutlich erkläret, alle vorfallende Begebenheiten umständlich bemercket, und deren Application an besondern Maschinen erwiesen, sondern auch die so genannten äusserlichen Kräfte, Als der Menschen, Thiere, Lufft, Feuer, ... beschrieben werden ; Alles mit ... Anmerckungen und besonderen neuen Inventionibus und Maschinen vermehret, und mit vielen Figuren deutlich vor Augen gestellet. Das ist: Deutliche Anleitung Zur Mechanic oder Bewegungs-Kunst, Darinnen nicht nur Die Fünff einfachen Rüst-Zeuge und die dabey nöthigen Lehr-Sätze deutlich erkläret, alle vorfallende Begebenheiten umständlich bemercket, und deren Application an besondern Maschinen erwiesen, sondern auch die so genannten äusserlichen Kräfte, Als der Menschen, Thiere, Lufft, Feuer, ... beschrieben werden ; Alles mit ... Anmerckungen und besonderen neuen Inventionibus und Maschinen vermehret, und mit vielen Figuren deutlich vor Augen gestellet.* Leipzig, 1724
- Lewis: *Iron Lighthouses*, 2012 | Lewis, Miles: *Iron Lighthouses*. In: *Construction History : International Journal of the Construction History Society*. Vol. 27, CHS, 2012
- Lienhard/Alpermann et al.: *Active Bending*, 2013 | Lienhard, Julian; Holger Alpermann; Christoph Gengnagel et al.: *Active Bending, A Review on Structures where Bending is used as a Self-Formation Process*. In: *International Journal of Space Structures*. Vol. 28, No. 3 & 4, S. 178-196, 2013
- Lombard, Phillipson: *bow and stone-tipped arrow*, 2015 | Lombard, Marlize; Laurel Phillipson: *Indications of bow and stone-tipped arrow use 64 000 years ago in KwaZulu-Natal, South Africa*. In: *Antiquity*. 84, Nr. 325, 2015, ISSN 0003-598X, S. 635–648. doi:10.1017/S0003598X00100134, 2015
- Love: *Résistance de la fonte*, 1852 | Love, G. H.: *Mémoire sur la Résistance du fer et de la fonte et l'emploi de ces métaux dans les constructions*. Carilian. Goeury et V. Dalmont Libraires-Éditions, Paris, 1852
- Lücke: *Leonardos Tagebücher*, 1940 | Lücke, Theodor.: *Leonardo da Vinci: Tagebücher und Aufzeichnungen*. Übersetz., P. List, Leipzig, 1940
- Mann: *Statik und Festigkeitslehre*, 2007 | Mann, Walther: *Vorlesungen über Statik und Festigkeitslehre : Einführung in die Tragwerkslehre*. Nachdr. der 2. überarb. Aufl., Aardt, Kassel, 2007
- Mannesmann: *Preislisten*, 1912 | Hrsg.: *Mannesmann-Röhrenwerke Düsseldorf: Preislisten*. Roerts, Hannover, 1912
- Marinoni: *Leonardos Schriften*, 1974 | Marinoni, Augusto: *Leonardos Schriften*. In: *Ladislaw Reti: Leonardo : Künstler : Forscher : Magier*. S. Fischer, F. a. M., 1974
- Marks: *Manufacture of Tubes*, 1903 | Marks, Edward, C. R.: *The Manufacture of Iron and Steel Tubes*. 2. erw. Aufl., The Technical Publishing Company Limited, London 1903
- Mäurer: *Walzkunst*, 1865 | Mäurer, Eduard: *Die Formen der Walzkunst und das Faconeisen, seine Geschichte, Benutzung und Fabrikation für die Praxis der gesamten Eisenbranche*. [sic] Carl Macken, Stuttgart, 1865
- McCleary: *Unzerstörbare Idee*, 2002 | McCleary, Peter: *Robert Le Ricolais' Suche nach der ,unzerstörbaren Idee'*. In: *Arch+.* Nr. 159-160, S. 64-68, Übersetz. Fritz Schneider, 2002
- Mehrtens: *Eisenbrückenbau*, 1908 | Mehrtens, G.: *Eisenbrückenbau*. 1. Bd., zweiter Teil der: *Vorlesungen über Ingenieurwissenschaften von G. Mehrtens*. Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1908
- Meissner/Wanke et al.: *Handbuch Federn*, 1993 | Meissner, Manfred; K. Wanke u. H. Schorcht: *Handbuch Federn : Berechnung und Gestaltung im Maschinen- und Gerätebau*. 2. bearb. Aufl., Verl. Technik, Berlin, 1993
- Meissner: *Geschichte der Metallfedern*, 2009 | Meissner, Manfred: *Die Geschichte der Metallfedern und Federntechnik in Deutschland*. Ilmenau Univ.-Verlag, Ilmenau, 2009
- Mengeringhausen: *Komposition im Raum*, 1983 | Mengeringhausen, Max: *Komposition im Raum : Die Kunst individueller Baugestaltung mit Serienelementen*. Bertelsmann Fachzeitschriften, Gütersloh, 1983
- Mengeringhausen: *Prinzip des Leichtbaues*, 1960 | Mengeringhausen, Max: *Das Prinzip des Leichtbaues und seine Bewertung in Natur und Technik*. In: *VDI-Zeitschrift*. S. 523-527, Jg.102, Nr. 13, Mai, 1960
- Meskouris/Hake: *Statik der Stabtragwerke*, 1999 | Meskouris, Konstantin u. Erwin Hake: *Statik der Stabtragwerke : Einführung in die Tragwerkslehre*. Springer, Berlin, 1999
- Müller/Alles: *Grafische Statik*, 2003 | Müller, Kurt u. Heinz Otto Alles: *Statik : Grafische Statik und Trägerlehre*. Kamprath-Reihe, 9. Aufl., Vogel Buchverl., Würzburg, 2003
- Müller: *Röhrenbrücken von Gußeisen*, 1850 | Müller, Hinrich: *Die Erbauung der eisernen Brücken*. In: *Die Brückenbaukunde in ihrem ganzen Umfange : Ein Handbuch für Ingenieure und Baumeister*. Romberg, Leipzig, 1850-54, Kapitel Röhrenbrücken von Gußeisen, 1850

- Musschenbroek: COHÆRENTIA CORPORUM FIRMORUM, 1729 | Van Musschenbroek, Petri: PHYSICÆ EXPERIMENTALES, ET GEOMETRICÆ, DE MAGNETE; TUBORUM CAPILLARIUM VITREORUMQUE SPECULORUM ATTRACTIONE, MAGNITUDE TERRÆ, COHÆRENTIA CORPORUM FIRMORUM, Hrsg. Samuelem Luchtmans, Leiden, 1729
- Neufert: Bauentwurfslehre, 1936 | Neufert, Ernst: Bauentwurfslehre : Grundlagen und Vorschriften über Anlagen, Bau, Gestaltung, Raumbedarf, Raumbeziehungen, Maße für Gebäude, Räume, Einrichtungen und Geräte, mit dem Menschen als Maß und Ziel : Handbuch für den Baufachmann, Bauherrn, Lehrenden und Lernenden. Bauwelt-Verl., Berlin, 1936
- Neufert: Bauordnungslehre, 1943 | Neufert, Ernst: Bauordnungslehre. Hrsg. Albert Speer, Volk und Reich Verl., Berlin, 1943
- Neumeyer: Architekturtheorie, 2002 | Neumeyer, Fritz: Quellentexte zur Architekturtheorie. S. 162, Prestel, 2002
- Nicholas/Tamke: Computational Strategies for Bending Active Structures, 2013 | Nicholas, Paul u. Martin Tamke: Computational Strategies for the Architectural Design of Bending Active Structures. In: International Journal of Space Structures. S. 215-228, Vol. 28, No. 3&4, 2013
- Nördling: Metall Viadukte, 1874 | Nördling, Wilhelm: Die Metall-Viadukte der Linie Commeny-Gannat (in das Deutsche übertragen von Friedrich Benedikt). In: Allgemeine Bauzeitung. Jg. 39 1874, S. 72-77 & 81-92, + Bl. 95-97, Wien, 1874
- o.A.: Bautabellen für Architekten, 1996 | o.A.: Bautabellen für Architekten mit europäischen und nationalen Vorschriften. Hrsg. Schneider, Klaus-Jürgen 12. Aufl., Werner-Verl., 1996
- o.A.: Begriffe aus dem Bauwesen, 1963 | o.A. : Begriffe und Begriffsbestimmungen aus dem Bauwesen. Hrsg. Deutscher Normenausschuss, zgst. von H. Frommhold, Beuth-Vertrieb, 1963
- o.A.: Brücke über den Hammerstrom, 1837 | o.A.: Beschreibung der über den Hammerstrom bei der Eisenhütte zu Peitz ausgeführten Brücke von eisernen Röhren. In: Allgemeine Bauzeitung. Hrsg.: Ludwig Förster, N° 8, Wien, 1837
- o.A.: Centennial Tower, 1874 | o.A.: Scientific American a Weekly Journal of Practical Information, Art, Science, Mechanics, Chemistry, and Manufactures. Vol. XXX, N° 4, 24. Januar, 1874
- o.A.: Cupola di S. Pietro, 1742 | o.A.: Parere di tre mattematici sopra i danni che si sono trovati nella Cupola di S. Pietro sul fine dell'Anno 1742
- o.A.: Denkmäler aus Eisen und Stahl, 2014 | o.A.: Denkmäler aus Eisen und Stahl, Dokumentation zum 18. Kölner Gespräch zu Architektur und Denkmalpflege in Duisburg. 19. Mai 2014. In: Mitteilungen aus dem LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland. Heft 19, 2014
- o.A.: Die Brücke von Saltash, 1857 | o.A.: Die Brücke von Saltash in der Bai von Plymouth. S. 189-191, In: Allgemeine Bauzeitung Wien, 22. Jg., Förster's artistische Anstalt, Wien, 1857
- o.A.: Die Röhrenbrücke in England, 1849 | o.A.: Die Röhrenbrücke bei Conway und über die Menai-straits auf der Chester-Holyhead-Eisenbahn in England. In: Allgemeine Bauzeitung. Hrsg. L. Förster., 14. Jg., 1849
- o.A.: Einführung in die DIN-Normen, 2008 | o.A.: Klein : Einführung in die DIN-Normen. Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung e.V., Bearb. von Dieter Alex, Andrea Fluthwedel, Wolfgang Goethe et al., 14. neubearb. Aufl., B.G. Teubner, Stuttgart, 2008
- o.A.: Eiserner Aussichtsturm, 1885 | o.A.: Eiserner Aussichtsturm bei Pforzheim. In: Deutsche Bauzeitung : Verkündungsblatt des Verbandes Deutscher Architekten- und Ingenieursvereine. Jg. 19, N° 90, S. 541-542, Berlin, 1885
- o.A.: Mannesmann Stahlrohrbau, 1955 | o.A.: Mannesmann Stahlrohrbau : 3087. Hrsg. Mannesmannröhren-Werke Aktiengesellschaft. 4. Aufl., Düsseldorf, 1955
- o.A.: Merkblatt 107, 1954 | o.A.: Hrsg. Beratungsstelle für Stahlverwendung: Ausstellungs- und Werbebauten aus Stahlrohr. In: Merkblätter über sachgemäße Stahlverwendung. Lfd. Nr. 107, Düsseldorf, 1954
- o.A.: Merkblatt 108, 1954 | o.A.: Hrsg. Beratungsstelle für Stahlverwendung: Zerlegbare Tribünen aus Stahlrohr. In: Merkblätter über sachgemäße Stahlverwendung. Lfd. Nr. 108, Düsseldorf, 1954
- o.A.: Merkblatt 109, 1954 | o.A.: Hrsg. Beratungsstelle für Stahlverwendung: Spielplatzgeräte aus Stahlrohr. In: Merkblätter über sachgemäße Stahlverwendung. Lfd. Nr. 109, Düsseldorf, 1954
- o.A.: Nur selten kehre ich zurück, 1974 | o.A.: Nur selten kehre ich zurück. In: Der Spiegel, Nr. 42, S. 150-156, 1974
- o.A.: Projekte zu Aussichtsthürmen | o.A.: Projekte zu Aussichtsthürmen für die nächste Pariser Weltausstellung. In: Deutsche Bauzeitung, N° 96, 02.12.1885, S. 580

- o.A.: **Stahlleichtbau**, 1950 | o.A.: Stahlleichtbau. In: Abhandlungen aus dem Stahlbau. Heft 4, Hrsg. Fachverband Stahlbau, Deutscher Stahlbau-Verband Bad Pyrmont, Industrie- und Handelsverl. Walter Dorn, Bremen Horn, 1950
- o.A.: **Stahlverwendung: Merkblatt 467**, 1981 | o.A.: Wassergefüllte Tragwerke. In: Merkblatt 467. Hrsg. Beratungsstelle für Stahlverwendung, 2. Aufl., 1981
- o.A.: **The Application of Iron to Railway Structures**, 1849 | o.A.: For Her Majesty's Stationery Office: Report of the Commissioners appointed to inquire into The Application of Iron to Railway Structures. William Clowes & Sons, London, 1849
- o.A.: **Things Themselves Lying**, 1973 | o.A.: Things Themselves Are Lying, And So Are Their Images : Interviews with Robert Le Ricolais. In: Structures Implicit and Explicit. Hrsg. James Bryan, Rolf Sauer, Graduate School of Fine Arts, University of Pennsylvania, Wittenborn & Company, S. 81-109, Philadelphia, 1973
- o.A.: **Viaduc de Grandfey**, 1867 | o.A.: Eisenbahnbrücke über die Saane bei Freiburg (Viaduc de Grandfey) auf der Eisenbahn von Lausanne über Freiburg nach Bern. Zürich, Verl. von Meyer & Zeller, [1867]. ETH-Bibliothek Zürich, Rar 3974, <http://doi.org/10.3931/e-rara-19405> / Public Domain Mark, 1867
- Oettingen v.: **Unterredung und Mathematische Demonstration**, 1890 | Oettingen von, Arthur: Unterredungen und Mathematische Demonstration über zwei neue Wissenszweige, die Mechanik und die Fallgesetze betreffend, von Galileo Galilei 1638. Aus dem Italienischen übersetz. und hrsg., Verl. Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1890
- Otto: **Bic**, 1985 | Hrsg. Otto, Frei: Bic Stand 1985. [Plakat] Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, 1985
- Otto: **IL 20 Aufgaben**, 1979 | Hrsg. Frei Otto: IL 20 Aufgaben : Probleme und Fragen in Forschung, Entwicklung und Anwendung des Leichtbaus. (Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, Nr. 20, 1979
- Otto: **IL 21 Grundlagen Form-Kraft-Masse**, 1979 | Hrsg. Frei Otto: IL 21 Grundlagen Form-Kraft-Masse. (Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, Nr. 21, 1979
- Otto: **IL 24 Prinzip Leichtbau**, 1997 | Hrsg. Frei Otto: IL 24 Prinzip Leichtbau. (Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, Nr. 24, 1979
- Otto: **IL 25 Experimente**, 1990 | Hrsg. Frei Otto: IL 25 Experimente Form-Kraft-Masse 5. (Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, Nr. 25, 1990
- Otto: **IL 31 Bambus**, 1985 | Hrsg. Otto, Frei: IL 31 Bambus Bamboo : Bambus als Baustoff : Bauen mit pflanzlichen Stäben. (Mitteilungen des Institutes für leichte Flächentragwerke (IL) Universität Stuttgart, Nr. 31, 1985
- Paulinyi: **Geschichte des Eisens**, 1987 | Paulinyi, A.: Das Puddeln : Ein Kapitel aus der Geschichte des Eisens. Oldenbourg Verl., München, 1987
- Petersen: **Stahlbau**, 2013 | Petersen, Christian: Stahlbau : Grundlagen der Berechnung und baulichen Ausbildung von Stahlbauten. 4. vollst. überarb. u. aktu. Aufl., Springer Vieweg, 2013
- Prechtl: **Technologische Encyklopädie**, 1830 | Prechtel, Johann, Joseph: Technologische Encyklopädie oder alphabetisches Handbuch der Technologie, der technischen Chemie und des Maschinenwesens. Zum Gebrauche für Kameralisten, Ökonomen, Künstler, Fabrikanten und Gewerbetreibende jeder Art. 20 Bd., Cotta'sche Buchhandlung, Stuttgart, 1830-1869
- Rechenberg: **Evolutionsstrategie**, 1973 | Rechenberg, Ingo: Evolutionsstrategie : Optimierung technischer Systeme nach Prinzipien der biologischen Evolution. problemata frommann holzbook, Stuttgart Bad Cannstatt, 1973
- Reti: **Elemente der Maschinen**, 1974 | Reti, Ladislao: Elemente der Maschinen. In: Ladislao Reti: Leonardo : Künstler : Forscher : Magier. S. Fischer, F. a. M., 1974
- Romberg: **Zimmerwerks-Baukunst**, 1847 | Romberg, Johann Andreas: Die Zimmerwerks-Baukunst in allen Theilen. 3. unv. Aufl., Glogau, 1847
- Rothery: **Tay Bridge Disaster**, 1880 | Rothery, C. Henry: Tay Bridge Disaster : Report of the Court of Inquiry, and Report of Mr. Rothery upon the Circumstances attending the Fall of a Portion of the Tay bridge on 28th December 1879, presented to both Houses of Parliament by Command of her Majesty. Eyre and Spottiswoode, London, 1880
- Russow: **Stahlsparen**, 1940 | Russow, Hermann: Stahlsparen im Stahlbau. In: Der Deutsche Baumeister : Zeitschrift der Fachgruppe Bauwesen e.V. im NS-Bund Deutscher Technik und Mitteilungen des Generalbevollmächtigten für die Regelung der Bauwirtschaft. S. 16-22. Jg., Januar, Berlin, 1940

- Rust: Stellmoor, 1943 | Rust, Alfred: Die Alt- und Mittelsteinzeitlichen Funde von Stellmoor. Hrsg. Archäologisches Institut des Deutschen Reiches, Karl Wachholtz Verl., Neumünster, 1943
- Rykwert: Adams Haus im Paradies, 2005 | Rykwert, Joseph: Adams Haus im Paradies : Die Urhütte von der Antike bis Le Corbusier. (amerikanisches Original 1972) Gebr. Mann Verl., Berlin 2005
- Sahmel: Hohlquerschnitte, 1983 | Sahmel, Paul: Hohlquerschnitte in der Schweisstechnik: Beispiele zur Gestaltung und Anwendung geschweisster Hohlquerschnitte im Hoch-, Apparate- und Maschinenbau. DVS Media, 1983
- Schädlich: Eisen in der Architektur, 2015 | Schädlich, Christian: Das Eisen in der Architektur des 19. Jahrhunderts. 1. Aufl., Geymüller, 2015
- Scheidegger: Frühgeschichte der Festigkeitslehre, 1992 | Scheidegger, Fritz: Zur Frühgeschichte der Festigkeitslehre. In: Aus der Bautechnikgeschichte. Bd. 2, Birkhäuser, Basel, 1992
- Schlenning: Mannesmann-Rohr im Kunstgewerbe, 1891 | Schlenning, W.: Das Mannesmann-Rohr in seiner Bedeutung für das Kunstgewerbe. In: Deutsche Bauzeitung. XXV. Jg., N° 69, S. 417-421 u. N° 70, S. 425-427, Berlin, 1891
- Schlichtherle: Pfahlbauten, 1997 | Schlichtherle, Helmut: Pfahlbauten rund um die Alpen. Konrad Theiss Verl., Stuttgart, 1997
- Schniete: Druckfestigkeit Harzer Fichtenholz, 1942 | Schniete, Robert: Untersuchungen über den Einfluß des Wassergehaltes auf die Druckfestigkeit von Harzer Fichtenholz. Dissertationsschrift TH Braunschweig, 1942
- Schock: Seilverspannte Druckstäbe, 1976 | Schock, Hans-Joachim: Untersuchungen zur Tragfähigkeit von seilverspannten Druckstäben. In: Forschungsberichte aus dem Institut für Tragkonstruktionen u. konstr. Entwerfen Universität Stuttgart, N° 4, Dissertationsschrift mit dem Titel: Untersuchungen zur Tragfähigkeit von seilverspannten Druckstäben durch geometrisch nichtlineare Berechnung mit finiten Stabelementen. Universität Stuttgart, 1976
- Schützeichel: Ursprung der Architektur, 2009 | Schützeichel, Rainer: Der Ursprung der Architektur : Mythen, Theorien und Thesen zur Behausung des Menschen. In: der architekt. 6/09, Berlin, 2009
- Schwanda: Mannesmannrohre in der Kriegstechnik, 1893 | Schwanda, Gustav: Mannesmannrohre: ihre Herstellung und ihre Verwendbarkeit namentlich in der Kriegstechnik. In: Mitteilungen aus dem Gebiete des Seewesens. Vol. XXI, N° VI u. VII, 1893
- Seidl: Lexikon der Bautypen, 2012 | Seidl, Ernst, Hrsg.: Lexikon der Bautypen : Funktionen und Formen der Architektur. Reclams Universal-Bibliothek Nr. 18972, durchgesehene u. aktu. Ausgabe, Stuttgart, 2012
- Shen/Chen et al.: Tubular Structures, 2008 | Hrgs: Shen, Z., Y.; Y. Y. Chen u. X. Z. Zhao: Tubular Structures XII : Proceedings of the 12th International Symposium on Tubular Structures. Shanghai, China, 8-10 Oktober 2008, CRC Press, 2008
- Siegel: Strukturformen, 1960 | Siegel, Curt: Strukturformen der modernen Architektur. Callwey, München, 1960
- Smith: History of Marine Engineering, 1937 | Smith, Edgar C.: A Short History of Naval and Marine Engineering. Cambridge, 1937
- Straub: Geschichte der Bauingenieurkunst, 1992 | Straub, Hans: Die Geschichte der Bauingenieurkunst : Ein Überblick von der Antike bis in die Neuzeit. 4. überarb. und erw. Aufl., Hrsg. Peter Zimmermann unter Mitarb. von Niklaus Schnitter; Hans K. jun. Straub, Birkhäuser, 1992
- Sudhues: Pfeilverletzungen, 2004 | Sudhues, Hubert: Wundballistik bei Pfeilverletzungen. Inaugural – Dissertation, Medizinischen Fakultät der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, 2004
- Szabó: Technische Mechanik, 1975 | Szabó, Istvan: Einführung in die Technische Mechanik : Nach Vorlesungen. 8. neu bearb. Aufl., Springer, 1975
- Teuffel: Adaptive Strukturen, 2004 | Teuffel, Patrick: Entwerfen adaptiver Strukturen : Lastpfadmanagement zur Optimierung tragender Leichtbaustrukturen. Dissertationsschrift, Fakultät Bau- und Umweltingenieurwissenschaft der Universität Stuttgart, Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruktion, 2004
- Thieme: Die ältesten Speere, 2005 | Thieme, Hartmut: Die ältesten Speere der Welt – Fundplätze der frühen Altsteinzeit im Tagebau Schöningen. In: Archäologisches Nachrichtenblatt. 10, S. 409-417, 2005
- Tietze: Vom Blasrohr zur Kontinental-Pipeline, 1979 | Tietze, Karl Albert: Vom Blasrohr bis zur Kontinental-Pipeline. In: Frontinus. Heft III, 1979
- Todhunter/Pearson: history of elasticity, 1893 | Todhunter, Isaac u. Karl Pearson: A history of the theory of elasticity and of the strength of materials. University Press, Cambridge, 1886-1893

- Turza: Pfahlbauten, o.J.** | Turza, Otto: Pfahlbauten in Afrika. Inaugural-Dissertation, Philosophische Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität zu Freiburg i. Br., o.J.
- Vitruvius: Zehn Bücher über Architektur, 1987** | Vitruvius Pollio, Marcus: Zehn Bücher über Architektur. 3. Aufl., Übersetz. und erläu. von Jakob Prestel, Verl. Valentin Koerner, Baden-Baden, 1987
- Wachsmann: Wendepunkt im Bauen, 1959** | Wachsmann, Konrad: Wendepunkt im Bauen. Krausskopf-Verl., Wiesbaden, 1959
- Wanke: Stahlrohrkonstruktionen, 1966** | Wanke, Josef: Stahlrohrkonstruktionen. Springer, Wien, 1966
- Wansleben: Leichtbautechnik, 1937** | Wansleben, Fritz: Leichtbautechnik : Handbuch über konstruktive Ausführung und theoretische Behandlung von Leichtbauwerken. Ernst Stauf Verl., Köln-Lindenthal, 1937
- Werner: Erste eiserne Brücken, 1974** | Werner, Ernst: Die ersten eisernen Brücken (1777-1859). Von der Fakultät für Bauwesen der TU München, Tag der Promotion 30.07.1974
- Werner: modulorum ratione, 1989** | Werner, D.: Die altrömische »modulorum ratione« als Zeugnis der Normung im Rohrleitungsbau der Antike. In: Fontinus. Heft XIV, S. 169ff, 1989
- Werner: Röhrenbrücke, 1969** | Werner, Ernst: Britannia- und Conway-Röhrenbrücke. Werner-Verl., Düsseldorf, 1969
- Whipple: Analyses and Comparisons, 1847** | Whipple, Squire, C. E.: An Essay on Bridge Building : containing Analyses and Comparisons of the Principal Plans in use, with Investigations as to the Best Plans and Proportions, and the Relative Merits of Wood and Iron, for Bridges. In: A Work on Bridge Building : Consisting of two Essays, the one Elementary and General, the Other Giving Original Plans, and Practical Details for Iron and Wooden Bridges. Hrsg. Squire C. E. H. H. Whipple, Curtiss, Utica, N. Y., 1847
- Whipple: Practical Details, 1847** | Whipple, Squire, C. E.: Essay N° II on Bridge Building given Practical Details and Plans for Iron and Wooden Bridges. In: A Work on Bridge Building : Consisting of two Essays, the one Elementary and General, the Other Giving Original Plans, and Practical Details for Iron and Wooden Bridges. Hrsg. Squire C. E. H. H. Whipple, Curtiss, Utica, N. Y., 1847
- Wittel/Muhs: Maschinenelemente, 2015** | Wittel, Herbert u. Dieter Muhs: Roloff/Matek Maschinenelemente : Normung, Berechnung, Gestaltung - Lehrbuch und Tabellenbuch. 22., vollst. überarb. Aufl., Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2015
- Zammattio: Naturwissenschaftliche Studie, 1974** | Zammattio, Carlo: Naturwissenschaftliche Studien. In: Ladislao Reti: Leonardo : Künstler : Forscher : Magier. S. Fischer, F. a. M., 1974

Internetquellen

- online: [http://eulerarchive.maa.org/translations, E065de](http://eulerarchive.maa.org/translations/E065de) | verfügbar unter: <http://eulerarchive.maa.org/docs/translations/E065de.pdf> [Zugriff: 04.01.2018; 14:50]
- online: <http://rsl.royalsocietypublishing.org/Hodgkinson> | verfügbar unter: <http://rsl.royalsocietypublishing.org/search?fulltext=Strength+of+Pillars&submit=yes&andexactfulltext=and&x=0&y=0> [Zugriff: 01.04.2016]
- online: <http://woerterbuchnetz/grimm/grimm.de/röhre> | verfügbar unter: http://woerterbuchnetz.de/cgi-bin/WBNetz/wbgui_py?sigle=DWB&mode=Vernetzung&lemid=GR06799#XGR06799 [Zugriff: 14.05.2014; 16:43]
- online: <https://de.wikipedia.org/Philosophie> | verfügbar unter: [https://de.wikipedia.org/wiki/Begriff_\(Philosophie\)#cite_note-1](https://de.wikipedia.org/wiki/Begriff_(Philosophie)#cite_note-1) [Zugriff: 06.04.2018; 16:34]
- online: <https://en.wikipedia.org/Schlachtschiff> | verfügbar unter: https://en.wikipedia.org/wiki/Russian_battleship_Imperator_Pavel_I [Zugriff: 27.02.2018; 19:00]
- online: www.codex-madrid.rwth-aachen.de | verfügbar unter: www.codex-madrid.rwth-aachen.de [Zugriff: permanent]
- online: www.codex-madrid.rwth-aachen.de/Stützen | verfügbar unter: <http://www.codex-madrid.rwth-aachen.de/madrid1/f177v/index.html> [Zugriff: 06.04.2017; 10:32]
- online: www.duden.de/Stab | verfügbar unter: http://www.duden.de/rechtschreibung/Stock_Pflanze_Ast_Klotz_Stab [Zugriff: 08.02.2017; 10:42]
- online: www.dwds.de/Stab | verfügbar unter: <https://www.dwds.de/wp/Stab> [Zugriff: 13.08.2018; 17:48] In: Das Wortauskunftssystem zur deutschen Sprache in Geschichte und Gegenwart
- online: [www.engineering-timelines.com/Aquädukt von Briare](http://www.engineering-timelines.com/Aquädukt_von_Briare) | verfügbar unter: <http://www.engineering-timelines.com/scripts/engineeringItem.asp?id=308> [Zugriff: 10.09.2017; 17:21]
- online: www.frontinus.de/portrait | verfügbar unter: <http://www.frontinus.de/portrait/index.html> [Zugriff: 24.08.2017; 13:48]
- online: www.iep.utm.edu/Prototype | verfügbar unter: <http://www.iep.utm.edu/concepts/#SH3c>; [Zugriff: 06.04.2018; 16:10]; c. Prototype/Exemplar Theories. In: Internet Encyclopedia of Philosophy IEP
- online: www.iep.utm.edu/Theory-theories | verfügbar unter: <http://www.iep.utm.edu/concepts/#SH3c> [Zugriff: 06.04.2018; 16:10] d. Theory-theories. In: Internet Encyclopedia of Philosophy
- online: www.leonardodigitale.com | verfügbar unter: www.leonardodigitale.com [Zugriff: permanent]
- online: [www.leonardodigitale.com/Codex Atlanticus Transkription S. 890r, Transkript](http://www.leonardodigitale.com/Codex_Atlanticus_Transkription_S._890r_Transkript) | verfügbar unter: www.leonardodigitale.com/index.php?lang=ENG; Codex Atlanticus, S. 0890r, Transkript [Zugriff: permanent]
- online: [www.leonardodigitale.com/Codex Atlanticus, S. 0410r, Transkript](http://www.leonardodigitale.com/Codex_Atlanticus_S._0410r_Transkript) | verfügbar unter: www.leonardodigitale.com/index.php?lang=ENG; Codex Atlanticus, S. 0410r, Transkript [Zugriff: permanent]
- online: [www.leonardodigitale.com/Codex Atlanticus, S. 890r; Transskript](http://www.leonardodigitale.com/Codex_Atlanticus_S._890r_Transskript) | verfügbar unter: www.leonardodigitale.com/index.php?lang=ENG; Codex Atlanticus, S. 0890r, Transkript [Zugriff: permanent]
- online: [www.leonardodigitale.com/Codex Paris A, S. 49r, Transkript](http://www.leonardodigitale.com/Codex_Paris_A_S._49r_Transkript) | verfügbar unter: www.leonardodigitale.com/index.php?lang=ENG; Codex Paris A, S. 49r, Transkript [Zugriff: permanent]
- online: [www.leonardodigitale.com/Paris A, S. 0048v, Transkript](http://www.leonardodigitale.com/Paris_A_S._0048v_Transkript) | verfügbar unter: www.leonardodigitale.com/index.php?lang=ENG; Codex Paris A, S. 0048r, Transkript [Zugriff: permanent]

Software

Software: Abaqus CAE 2016□T05 | verfügbar unter: <https://www.tu-braunschweig.de/it/service-interaktiv/software/liste>; Lizenznehmer Institut für Stahlbau [Zugriff: permanent]

Software: arndt-bruenner□kreissehne | verfügbar unter: <http://www.arndt-bruenner.de/mathe/scripts/kreissehnen.htm> © Arndt Brünner, 6. 8. 2005, Version: 2. 1., 2015, [Zugriff: 11.06.2018; 16:11]

Software: DIAdem2017SP1□Messdaten | verfügbar unter: <http://www.ni.com/download/diadem-development-system-2017-sp1/7073/en/>; Lizenznehmer Institut für Stahlbau [Zugriff: permanent]

Normen

DIN 1050: Stahl im Hochbau, 1946 | DIN 1050: Berechnungsgrundlagen für Stahl im Hochbau, 1946 Oktober

DIN 4100: Geschweißte Stahlhochbauten, 1956 | DIN 4100: Geschweißte Stahlhochbauten - Berechnung und bauliche Durchbildung, Dezember, 1956

DIN 4114: Stabilitätsfälle, 1952 | DIN 4114: Stabilitätsfälle (Knickung, Kippung, Biegung), Oktober, 1952

DIN 4115: Stahlleichtbau, 1950 | DIN 4115: Stahlleichtbau und Stahlrohrbau im Hochbau; Richtlinien für die Zulassung, Ausführung, Bemessung, August, 1950

DIN EN 10210-1: Warmgefertigte Hohlprofile, 2006 | DIN EN 10210-1:2006: Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen —Teil 1: Technische Lieferbedingungen. DIN, 2006

DIN EN 10210-2: Warmgefertigte Hohlprofile, 2006 | DIN EN 10210-2:2006: Warmgefertigte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 2: Grenzabmaße, Maße und statische Werte. DIN, Juli, 2006

DIN EN 10219-1: Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile, 2006 | DIN EN 10219-1:2006: Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 1: Technische Lieferbedingungen. DIN, Juli, 2006

DIN EN 10219-2: Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile, 2006 | DIN EN 10219-2:2006: Kaltgefertigte geschweißte Hohlprofile für den Stahlbau aus unlegierten Baustählen und aus Feinkornbaustählen – Teil 2: Grenzabmaße, Maße und statische Werte. DIN, Juli, 2006

DIN EN 10305-1 Präzisionsstahlrohre, 2016 | DIN EN 10305-1: Präzisionsstahlrohre – Technische Lieferbedingungen – Teil 1: Nahtlose kaltgezogene Rohre; Deutsche Fassung EN 10305-1: August 2016

EN 10266: Stahlrohre und Hohlprofile, 2003 | EN 10266:2003 (D): Stahlrohre, Fittings und Hohlprofile für den Stahlbau : Symbole und Definition von Begriffen für die Verwendung in Erzeugnisnormen. CEN, 2003

Patente

Deutsches Bundespatent #874 657, 1953 | Mengerlinghausen, Max, Übernahme des Deutschen Reichspatents Deutsches v. 12. März 1943: Verbindung von Rohrstäben und knotenbildenden Verbindungsstücken, insbesondere für zerlegbare Fachwerkkonstruktionen. 12.03.1953

Deutsches Reichspatent #34617, 1885 | Dr. Fritz Kögel, Kaiserliches Patentamt Deutsches Reich: Patent #34617: Schrägwalzverfahren nebst zugehörigem Walzwerk. 27.02.1885

Deutsches Reichspatent #59052, 1891 | Dr. Fritz Kögel, Kaiserliches Patentamt Deutsches Reich: Patent #59052: Verfahren und Walzwerk zum Formen und Kalibrieren von stabförmigen Körpern und Platten mit pilgerschrittförmiger Bewegung des Werkstückes. 06.03.1891

Englisches Patent: Specification No. 3617, 1812 | Osborn, Henry: Specification No. 3617, for machinery for welding and making barrels of firearms and other cylindrical articles, 1812

Englisches Patent: Specification No. 3740, 1813 | Osborn, Henry: Specification No. 3740, machinery for tapering gun barrels, & c., 1813

US Patent #856,838, 1907 | Bell, Graham Alexander; McNeil, H. P.: Connection Device for the Frames of aerial Vehicles and other Structures. 11.06.1907

Archivalien

- Archivale Leonardo: Codex Arundel, S. 11r | Aus: Leonardo da Vinci: Codex Arundel. Archiv: British Museum, London, digitale Kopie online: www.leonardodigitale.com [Zugriff: permanent]
- Archivale Leonardo: Codex Atlanticus, S. 71v, 410r, 890r | Aus: Leonardo Da Vinci: Codex Atlanticus. Archiv: Biblioteca Ambrosiana Mailand; digitale Kopie online: www.leonardodigitale.com [Zugriff: permanent]
- Archivale Leonardo: Codex Foster 3, S. 29r, 177v | Aus: Leonardo da Vinci: Codex Foster 3. Archiv: Victoria and Albert Museum, London, digitale Kopie online: www.leonardodigitale.com [Zugriff: permanent]
- Archivale Leonardo: Codex Madrid I, S. 189v, 177v, 155r, 136v, 136r, 135v, 135r, 165v | Aus: Leonardo Da Vinci: Codex Madrid I. Archiv: Biblioteca Nacional Madrid; digitale Kopie online: www.leonardodigitale.com [Zugriff: permanent]
- Archivale Leonardo: Codex Paris A, S. 45v, 46v, 49r | Aus: Leonardo Da Vinci: Codex Paris A. Archiv: Institute de France Paris, digitale Kopie online: www.leonardodigitale.com [Zugriff: permanent]
- Archivale Mannesmann: Dr. Fritz Kogel, 1892 | Reinhard Mannesmann an Dr. Fritz Kogel, Komotau, 13.05.1892, Mannesmann-Archiv, Faksimile und Transkription Sammlung Burkhardt
- Archivale Mannesmann: Rohrthürme (Abb. VIII. 14: Rohrthürme [sic] der Fa. Mannesmann aus nahtlosem Stahlrohr unrealisiert, vermut. 1892). Archiv: Mannesmann-Archiv, Faksimile aus Sammlung Burkhardt
- Archivale Mare: Röhrenbrücke über den Hammerstrom bei Peitz (Abb. VII.32: Röhrenbrücke über den Hammerstrom bei Peitz, 1829). Archiv: Landesarchiv Nordrhein-Westfalen, Abt. Westfalen, Kartensammlung A, Nr. 16538, Peitz (Peitz) - Röhrenbrücke über den Hammer-Strom - Grundriß, Schnitt, An-sicht, Details - 1832 - 1 Fuß = 5,3 cm; 3 Fuß = 8, cm; 30 Fuß = 11,3 cm - 24 x 61 - Druck: Prêtre - gez.: Schwenger; G. Büttner - gestochen: C. Mare - Regierung Arnberg
- Archivale Monatskonkurrenz: Pendelstütze (Abb. IX. 6: Architektonische Formgebung einer Pendelstütze der Berliner Stadtbahn. Monatskonkurrenz März 1880). Archiv: Architekturmuseum TU Berlin, Digitale Kopie online: <http://deutschefotothek.de/documents/obj/71134858>, © Architekturmuseum der Technischen Universität Berlin in der Universitätsbibliothek [Zugriff: permanent]
- Archivale Schlachtschiff: Imperator Pavel (Abb. VIII. 12: Imperator Pavel I mit Groß- und Vormars auf dreiachsigen hyperboloiden Gittermasten aus Rohren, 1912). Digitale Kopie online: https://en.wikipedia.org/wiki/Russian_battleship_Imperator_Pavel_I [Zugriff: 27.02.2018; 19:00]
- Archivale Schniete: Personalakte, 1956 | Aus: Universitätsarchiv Technische Universität Braunschweig, Signatur B7 : 495.
- Archivale Schniete: Stützenkonstruktionen (Abb. VIII. 5: Vergleich verschiedener Stützenkonstruktionen bei gleich Nutzlast, N° 5 Gusseisenrohr, Prof. Schniete TH Braunschweig 1932). Aus: Planblatt Prof. Dr.-Ing. Robert Schniete, Technische Hochschule Braunschweig, Januar 1932, im Bestand der Sammlung für Architektur und Ingenieurbau der TU Braunschweig (SAIB) G71 II/1.1

Messdaten

Kapitel 12.1.3 Beschreibung des Verformungsverhaltens

Screenshot Software: arndt-bruenner-kreissehne | verfügbar unter: <http://www.arndt-bruenner.de/mathe/scripts/kreissehnen.htm> © Arndt Brünner, 6. 8. 2005, Version: 2. 1., 2015, [Zugriff: 11.06.2018; 16:11]

Rechner für Kreissehnen

← → ↻ Sicher <https://www.arndt-bruenner.de/mathe/scripts/kreissehnen.htm> 🔍 ☆ ⌵

Rechner für Sehnen und Segmente Matheseiten-Übersicht zurück

Geben Sie zwei Werte an (jedoch nicht die beiden Winkel oder zwei aus r, u und A), die restlichen werden berechnet.

gegeben	berechnet
s =	199,666276855732
h =	994,165552835743
r =	999,165552835743
b =	200
c =	6077,942321017509
u =	6277,942321017509
s+b =	399,666276855732
s+c =	6277,608597873241
d =	11,468725948462*
β =	174,265637025769*
d =	99,958268934378
a =	5
A =	3136351,8549251836
B =	665,888027108274
C =	3135685,9668980753

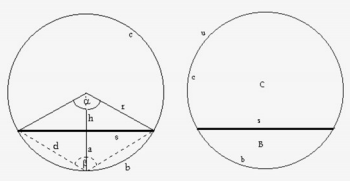
Runden auf: 12 Kommastellen

Rechenweg:

Approximation von alpha mit
 $\cos(\alpha/2) + a/b \cdot \alpha - 1$ (alpha im Bogenmaß)
 $r = b/\alpha$ (alpha im Bogenmaß)
 $h = r - a$
 $s = 2 \cdot \sqrt{a \cdot (2r - a)}$
 $[s+b] = s + b$
 $\beta = 180^\circ - \alpha/2$ (Grad) oder $\beta = \pi - \alpha$
 $d = \sqrt{a^2 + s^2/4}$
 $u = 2 \cdot \pi \cdot r$
 $c = u - b$
 $[s+c] = s + c$
 $A = \pi \cdot r^2$
 $C = \pi \cdot (r^2 - \alpha/2 + \sin(\alpha/2))$ (alpha im Bogenmaß)
 $B = A - C$

sqrt ist die Quadratwurzel.
 Die Argumente der trigonometrischen Funktionen und die Funktionswerte der Arkusfunktionen sind im Bogenmaß zu verstehen.

Neu



s: Länge der Sehne
 h: Abstand des Kreismittelpunktes zur Sehne
 r: Kreisladius
 b: Bogenlänge des kleinen Kreisabschnitts
 c: Bogenlänge des großen Kreisabschnitts
 u: Kreisumfang
 s+b: Umfang des kleinen Segments
 s+c: Umfang des großen Segments
 e: Mittelpunktswinkel der Sehne
 β: Mittelpunktswinkel unter der Sehne
 a: Höhe des kleinen Segments
 A: Flächeninhalt des Kreises
 B: Flächeninhalt des kleinen Segments
 C: Flächeninhalt des großen Segments

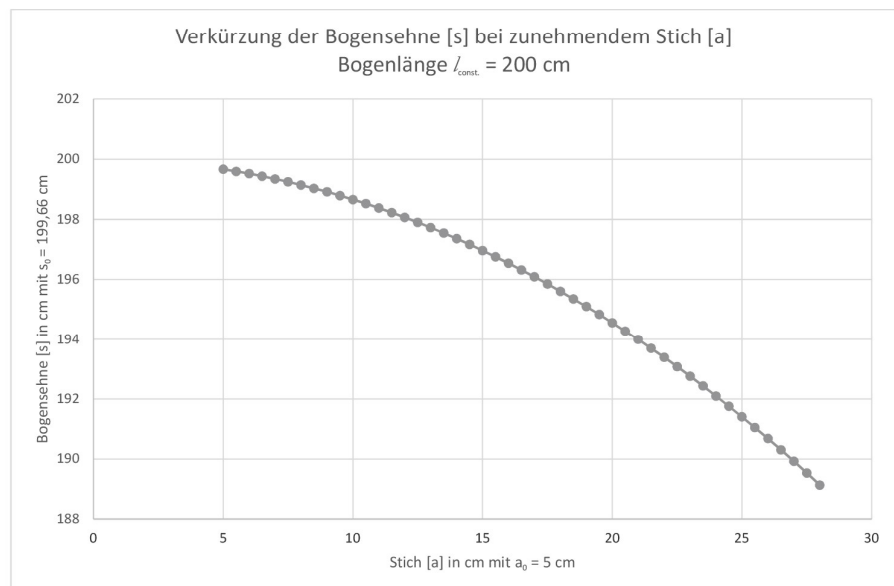
© Arndt Brünner, 6. 8. 2005
Version: 2. 1. 2015

Zu Abb. XII. 6: Approximation der Kopfverschiebung bzw. Verkürzung der Sehne

Zu Abb. XII. 6: Approximation der Kopfverschiebung bzw. Verkürzung der Sehne

Stich Länge Sehne Berechnung mit Software: arndt-bruennerkreissehne

0	
5	199,666
5,5	199,596
6	199,519
6,5	199,436
7	199,345
7,5	199,248
8	199,144
8,5	199,033
9	198,916
9,5	198,792
10	198,660
10,5	198,522
11	198,377
11,5	198,226
12	198,067
12,5	197,901
13	197,729
13,5	197,549
14	197,362
14,5	197,169
15	196,968
15,5	196,760
16	196,545
16,5	196,323
17	196,093
17,5	195,857
18	195,613
18,5	195,361
19	195,103
19,5	194,837
20	194,563
20,5	194,282
21	193,994
21,5	193,698
22	193,394
22,5	193,082
23	192,763
23,5	192,436
24	192,101
24,5	191,759
25	191,408
25,5	191,049
26	190,683
26,5	190,308
27	189,924
27,5	189,533
28	189,133



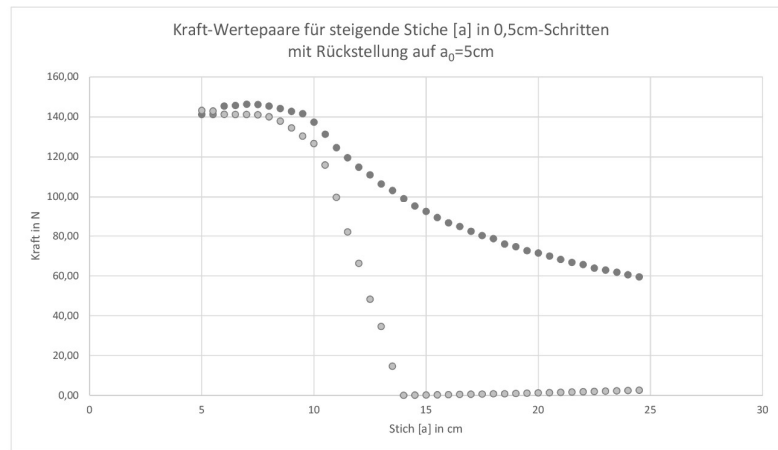
Messdaten

Kapitel 12.2 Bewertung eines spezifischen Modells

Simulation mit Software: Abaqus CAE 2016□T05 | verfügbar unter: <https://www.tu-braunschweig.de/it/service-interaktiv/software/liste>; Lizenznehmer Institut für Stahlbau [Zugriff: permanent]

Zu Abb. XII. 9: Simulation der Zugkraft in der Sehne bei unterschiedlichen Stichen a

Kraft Sim	Be	Stich h	cm	Stich t	cm	Paare	
141,25		-1,38				5	141,25
143,26				6,94		5	143,26
141,26		-1,38				5,5	141,26
142,91				5,31		5,5	142,91
141,29		-1,25				6	141,29
145,43				19,60		6	145,43
141,26		-1,38				6,5	141,26
145,71				21,63		6,5	145,71
141,26		-1,38				7	141,26
146,35				27,78		7	146,35
141,06		-1,31				7,5	141,06
146,20				31,86		7,5	146,20
140,04		-1,34				8	140,04
145,45				36,32		8	145,45
137,86		-1,25				8,5	137,86
144,16				41,74		8,5	144,16
134,50		-0,74				9	134,50
142,82				47,22		9	142,82
130,41		-1,01				9,5	130,41
141,64				51,96		9,5	141,64
126,72		-0,91				10	126,72
137,38				57,76		10	137,38
115,94		-0,36				10,5	115,94
131,36				64,21		10,5	131,36
99,80		0,35				11	99,80
124,66				70,75		11	124,66
82,00		2,26				11,5	82,00
119,61				75,99		11,5	119,61
66,24		2,88				12	66,24
114,89				81,63		12	114,89
48,23		2,72				12,5	48,23
111,03				86,47		12,5	111,03
34,58		3,66				13	34,58
106,50				92,03		13	106,50
14,63		3,62				13,5	14,63
103,24				97,34		13,5	103,24
0,01		4,35				14	0,01
99,18				103,32		14	99,18
0,07		10,90				14,5	0,07
95,00				110,58		14,5	95,00
0,18		18,42				15	0,18
92,27				115,86		15	92,27
0,26		23,76				15,5	0,26
89,16				120,90		15,5	89,16
0,35		29,57				16	0,35
86,60				126,37		16	86,60
0,45		35,13				16,5	0,45
84,75				131,39		16,5	84,75
0,53		39,80				17	0,53
82,33				136,38		17	82,33
0,61		45,24				17,5	0,61
80,13				142,41		17,5	80,13
0,76		51,09				18	0,76
78,62				146,30		18	78,62
0,83		55,06				18,5	0,83
75,88				152,25		18,5	75,88
0,98		61,79				19	0,98
74,58				157,54		19	74,58
1,11		66,43				19,5	1,11
72,57				162,43		19,5	72,57
1,24		71,86				20	1,24
71,43				166,27		20	71,43
1,30		75,63				20,5	1,30
69,86				172,30		20,5	69,86
1,49		81,29				21	1,49
68,16				177,83		21	68,16
1,62		86,96				21,5	1,62
66,71				181,26		21,5	66,71
1,76		91,05				22	1,76
65,63				187,44		22	65,63
1,92		96,39				22,5	1,92
63,83				192,93		22,5	63,83
2,11		102,40				23	2,11
62,86				197,29		23	62,86
2,25		106,57				23,5	2,25
61,76				203,21		23,5	61,76
2,39		112,01				24	2,39
60,53				208,17		24	60,53
2,57		117,04				24,5	2,57
59,45				213,57		24,5	59,45

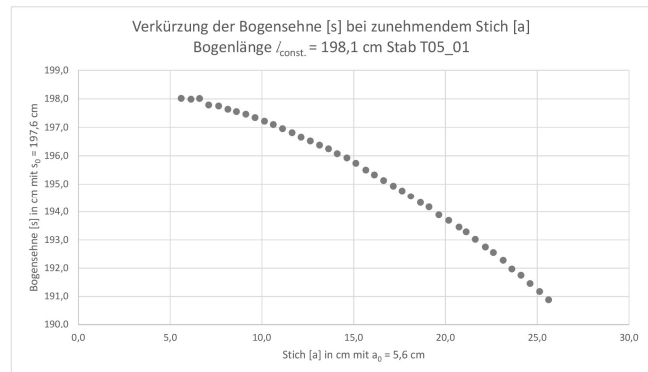


Kapitel 12.3.2 Versuchsdurchführung und Einordnung der Ergebnisse

Zu Abb. XII. 13: Abhängigkeit der Sehnenlänge und Stich bei Probe T05_01

T0501 entspricht Datei T0501_005 u. 004

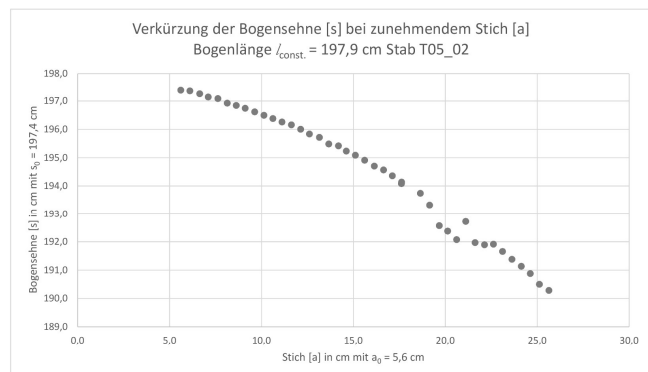
Aus den Rohdaten				Daten Graph	
Zeit1	Kraft	Weg_Rohr	Weg_Seil	Stich in cm	Bogensehne in cm
4,35	184,588388	-0,0198367	-0,8072023	5,6	198,0
25,46	186,11429	5,3635462	-1,1093309	6,1	198,0
58,94	186,907759	10,0053407	-0,8804456	6,6	198,0
119,97	184,069581	14,9523156	-3,1296254	7,1	197,8
176,19	188,403143	20,4150454	-3,4869865	7,6	197,6
269,37	179,522393	25,4200046	-4,8677348	8,1	197,6
322,63	183,764401	30,1228351	-5,478463	8,6	197,6
429,39	180,80415	35,2529183	-6,3736934	9,1	197,5
566,44	176,409552	40,2517739	-7,5730526	9,6	197,3
644,85	175,310903	45,3574426	-8,8273442	10,1	197,2
757,73	171,740291	50,1823453	-9,9870298	10,6	197,1
1178,06	168,444343	55,2666514	-11,448844	11,1	197,0
1349,89	161,120012	60,4394598	-12,892348	11,6	196,8
1474,68	159,685664	65,2857252	-14,436561	12,1	196,7
1568,64	155,565728	70,3761349	-15,776303	12,6	196,5
1666,31	151,873045	75,3688969	-17,22591	13,1	196,4
1781,14	151,201648	80,2944891	-18,550393	13,6	196,2
1845,9	145,983062	85,0186923	-20,250248	14,1	196,1
1957,79	141,710536	90,3196765	-21,724269	14,6	195,9
2049,56	141,710536	95,1964599	-23,65301	15,1	195,7
123,45	134,599832	100,62562	-25,990692	15,7	195,5
231,84	136,400397	105,264363	-27,73022	16,1	195,3
340,12	135,118639	110,284581	-29,698634	16,6	195,1
491,82	132,219425	115,609979	-31,657893	17,2	194,9
637,95	128,221561	120,355535	-33,357748	17,6	194,8
775,98	127,367056	125,085832	-35,396353	18,1	194,6
931,73	126,634623	130,42649	-37,676051	18,6	194,5
1055,32	122,972457	135,050491	-39,262989	19,1	194,2
1212,49	122,941939	140,390631	-42,052338	19,6	193,9
1873,11	118,364233	145,731289	-44,042115	20,2	193,7
2059,72	116,868849	151,438163	-46,431678	20,7	193,5
2242,04	113,389792	155,268177	-48,125429	21,1	193,3
2402,93	113,511864	160,242618	-50,762188	21,6	193,0
2526,52	112,291142	165,766384	-53,463035	22,2	192,8
2663,9	108,812085	170,130465	-55,477226	22,6	192,6
2834,31	107,164111	175,425345	-58,159762	23,1	192,3
2959,97	108,476387	180,201419	-61,266499	23,6	192,0
3174,46	104,386969	185,160601	-63,482109	24,1	191,8
3314,02	104,844739	190,150301	-66,424048	24,6	191,5
3444,18	101,304646	195,307851	-69,23476	25,1	191,2
3600,8	100,450141	200,175479	-72,179751	25,6	190,9



Zu Abb. XII. 14: Abhängigkeit der Sehnenlänge und Stich bei Probe T05_02

T0502 entspricht Datei T0501_007

Aus den Rohdaten				Daten Graph	
Stich	Kopf			Stich in cm	Bogensehne in cm
0,0686656	-0,1419089			5,6	197,4
5,02784771	-0,4074159			6,1	197,4
10,3532464	-1,4053559			6,6	197,3
15,0225071	-2,5711452			7,1	197,1
20,2716106	-3,1143664			7,6	197,1
25,3681239	-4,7379263			8,1	196,9
30,2357519	-5,5497063			8,6	196,8
35,1491569	-6,5476463			9,1	196,7
40,3372244	-7,7958343			9,6	196,6
45,3574426	-9,0318151			10,1	196,5
50,2098116	-10,194553			10,6	196,4
55,1842527	-11,412222			11,1	196,3
60,265507	-12,370489			11,6	196,2
65,2857252	-13,972686			12,1	196,0
70,1380941	-15,608453			12,6	195,8
75,4940108	-16,847486			13,1	195,7
80,6363012	-19,148547			13,7	195,5
85,8548867	-19,792477			14,2	195,4
90,0968948	-21,666285			14,6	195,2
95,117113	-23,137255			15,1	195,1
100,106813	-24,885939			15,6	194,9
105,340658	-26,936751			16,1	194,7
110,406653	-28,325322			16,6	194,6
115,213245	-30,360876			17,1	194,4
120,187686	-32,573434			17,6	194,1
120,172427	-33,119707			17,6	194,1
130,457008	-36,559091			18,6	193,7
135,477226	-40,7187			19,1	193,3
140,695811	-48,284123			19,7	192,6
145,273518	-50,225071			20,1	192,4
150,156405	-53,218891			20,6	192,1
155,100328	-46,770428			21,1	192,7
160,2121	-54,287022			21,6	192,0
165,323873	-55,016403			22,1	191,8
170,160983	-54,842451			22,6	191,9
175,165942	-57,409018			23,1	191,7
180,216678	-60,180056			23,6	191,4
185,32845	-62,630655			24,1	191,1
190,211337	-65,20943			24,6	190,9
195,201038	-68,969253			25,1	190,5
200,373846	-71,157397			25,6	190,3





Zu Abb. XII.19: Plastisch verformte Probekörper [hier Artikelposition 194548]

P.H. Brauns Partner für Technik		Stahl und Werkstoffe Heizung und Sanitär Bau- und Werkzeugtechnik Elektrotechnik		TDV GEBÄUDE	
P.H. Brauns GmbH & Co. KG - Partner für Technik - Granzstrasse 30 • 30165 Hannover					
		Am Hafen 28 38112 Braunschweig Franz Nowotnik Filialeleiter Braunschweig Tel: 0531 / 310597-30 Fax: 0531 / 310597-31 franz.nowotnik@phbrauns.de www.phbrauns.de			
Auftragsbestätigung Nr. 358432 *****		Datum : 4.04.18 / 16:08 Kundennr.: 00 / 09 / 132006 Währung : EUR			
Bestellt am 4.04.18 durch Hoyer, Sebastian Kommission -					
Sehr geehrte Damen und Herren,					
vielen Dank für Ihren Auftrag, den wir gemäß unseren allgemeinen Verkaufs- und Lieferungsbedingungen, einzusehen unter www.phbrauns.com, wie folgt bestätigen:					
Artikel/ Position	Menge	Bezeichnung	Preis D	Wert StStI	
194548 1	18,00 M	Nahtl.Präz.-Rohr 12x0,5mm 10305-1 E235+N 3 x ca. HL 6 Mtr.	7,99 1	143,82 1	
194574 2	12,00 M	Nahtl.Präz.-Rohr 12x1,0mm 10305-1 E235+N 2 x ca. HL 6 Mtr.	6,99 1	83,88 1	
099006 3	1 S	Lieferkostenpauschale	29,90 1	29,90 1	
-----			-----		
Gesamt-Netto			EUR	257,60	
Stal 1 Ust. 19,00 % von			257,60	48,94	
-----			-----		
Gesamt-Brutto			EUR	306,54	
-----			=====		
Voraussichtlicher Termin (unter Vorbehalt): Lieferung bis 13.04.18.					
Die Ware wird an folgende Versandadresse geliefert: Beethovenstr. 51 DE-38106 Braunschweig					
Zahlbar innerhalb von 21 Tagen Netto ohne Abzug.					
Für die Berechnung der Mehrwertsteuer wird der zum Zeitpunkt					
Hauptfiliale: 30165 Hannover, Granzstrasse 30, Telefon (0511) 95 96 0, Fax (0511) 95 96 197, E-Mail info@phbrauns.de Stützpunkt: 30465 Hannover, Mercedesstrasse 8, Telefon (0511) 95 96 280, Fax (0511) 95 96 120, E-Mail info@phbrauns.de Filiale: 38112 Braunschweig, Am Hafen 28, Telefon (0531) 310 597 30, Fax (0531) 310 597 31, E-Mail braunschweig@phbrauns.de Geschäftsführer: Felix Herbolab, Henry Heydemann • Handelsregister AG Hannover HRB 23368, HRB 7050 • www.phbrauns.de Commerzbank AG • BLZ 250 800 20 • Konto 100 001 900 • BIC: DRESDE33HAN • IBAN: DE 69 2508 0020 0100 0019 00 • UST-ID Nr. DE 115 695 429					

Messdaten

Protokoll Tastversuch T05_01:

05.06.2018 (T05_01)

A0 = 50,00mm (Ausgangswert) = 0,0

Dati: Rohr_T0501_004

 $s_0 = 197,6 \text{ cm}$ $N_0 = 188,2 \text{ N}$

Gewicht Rohr: 286,88g

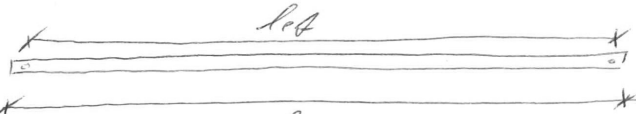
✓	Bemerkung
A0	
A0 + 5	
A0	
A0 + 10	
A0	
A0 + 15	
A0	
A0 + 20	
A0	
A0 + 25	
A0	
A0 + 30	
A0	
A0 + 35	
A0	
A0 + 40	
A0	
A0 + 45	
A0	
A0 + 50	
A0	
A0 + 55	
A0	
A0 + 60	
A0	
A0 + 65	
A0	
A0 + 70	

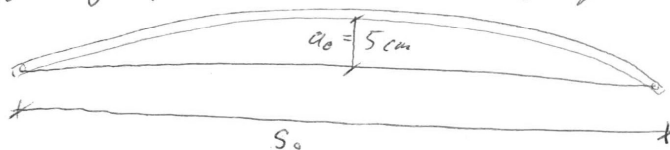
✓	Bemerkung
A0	
A0 + 75	
A0	
A0 + 80	
A0	
A0 + 85	
A0	
A0 + 90	
A0	
A0 + 95	
A0	
A0 + 100	
A0	
A0 + 105	
A0	
A0 + 110	3mm verbl.
A0	
A0 + 115	
A0	5mm verbl.
A0 + 120	
A0	2mm verbl.
A0 + 125	
A0	15mm
A0 + 130	
A0	17mm
A0 + 135	
A0	22mm
A0 + 140	

✓	Bemerkung
A0	30mm
A0 + 145	
A0	22mm
A0 + 150	
A0	37mm
A0 + 155	
A0	40mm
A0 + 160	
A0	54mm
A0 + 165	
A0	50mm
A0 + 170	
A0	54mm
A0 + 175	
A0	59mm
A0 + 180	
A0	66mm
A0 + 185	
A0	69mm
A0 + 190	
A0	75mm
A0 + 195	
A0	81mm
A0 + 200	
A0	85mm

* neue Dati nach Unterbrechung: "- 005"

** Öl an Laufschiene

l_{eff}  Art des Zerschnitts: Rohrschn.
 Präzisionsstahlrohr
 DIN EN 10315-1
 12 x 0,5 mm E235 + N
 Zustand: leichte Delle 2,3 cm vom linken Ende; Abweichung um ca. 1,5 mm von der geraden Achse
 s_0 : Sehnenlänge bei Ausgangswert von $\alpha_0 = 5 \text{ cm}$
 l_0 : Probentlänge über alles: 200,0 cm
 l_{eff} : zentrischer Abstand Rohrungen $\phi 9,05 \text{ cm}$
 $\rightarrow l_{eff} = 198,6 \text{ cm} - 0,05 \text{ cm} = 198,1 \text{ cm}$
 (gemessen: äußere Rand der Rohrung - 0,05 cm)
 N_0 : Zugkraft in der Sehne bei Ausgangswert von $\alpha_0 = 5 \text{ cm}$



11.06.2018

A0 = 50,00mm (Ausgangswert) = 0,0 $s_0 = 1,9774m$

(T05_02)

Dateiname -007

✓	Bemerkung
✓	A0
✓	A0 + 5
✓	A0
✓	A0 + 10
✓	A0
✓	A0 + 15
✓	A0
✓	A0 + 20
✓	A0
✓	A0 + 25
✓	A0
✓	A0 + 30
✓	A0
✓	A0 + 35
✓	A0
✓	A0 + 40
✓	A0
✓	A0 + 45
✓	A0
✓	A0 + 50
✓	A0
✓	A0 + 55
✓	A0
✓	A0 + 60
✓	A0
✓	A0 + 65
✓	A0
✓	A0 + 70

✓	Bemerkung
✓	A0
✓	A0 + 75
✓	A0
✓	A0 + 80
✓	A0
✓	A0 + 85
✓	A0
✓	A0 + 90
✓	A0
✓	A0 + 95
✓	A0
✓	A0 + 100
✓	A0
✓	A0 + 105
✓	A0
✓	A0 + 110
✓	A0
✓	A0 + 115
✓	A0
✓	A0 + 120
✓	A0
✓	A0 + 125
✓	A0
✓	A0 + 130
✓	A0
✓	A0 + 135
✓	A0
✓	A0 + 140

✓	Bemerkung
✓	A0
✓	A0 + 145
✓	A0
✓	A0 + 150
✓	A0
✓	A0 + 155
✓	A0
✓	A0 + 160
✓	A0
✓	A0 + 165
✓	A0
✓	A0 + 170
✓	A0
✓	A0 + 175
✓	A0
✓	A0 + 180
✓	A0
✓	A0 + 185
✓	A0
✓	A0 + 190
✓	A0
✓	A0 + 195
✓	A0
✓	A0 + 200
✓	A0

(Mittelpunkt um Breite Chip verschoben)

(Mittelpunkt um Breite d. Chip verschoben)

T05 01: Rohr-T0501-005 / +_004 (zusammenführen)

T05 02: " " - " " - 007 Gewicht: 286,45g

T05 03: " " - " " - 008

$$l_{ef} = 138,4cm - 0,05cm = 137,3cm$$

$$l_0 = 200,0cm$$

Querschnitt leicht flach gedrückt (ca. 60cm entfernt von jedem Ende) [11,0mm / 12,8mm]

-Abschreibung ca. 2mm von der Achse

Messdaten

Protokoll Tastversuch T05_03:

11.06.2018

(T05_03)

Dateiname -008

A0 = 50,00mm (Ausgangswert) = 0,0 $s_0 = 1,9675m$

✓	Bemerkung
✓	A0
✓	A0 + 5
✓	A0
✓	A0 + 10
✓	A0
✓	A0 + 15
✓	A0
✓	A0 + 20
✓	A0
✓	A0 + 25
✓	A0
✓	A0 + 30
✓	A0
✓	A0 + 35
✓	A0
✓	A0 + 40
✓	A0
✓	A0 + 45
✓	A0
✓	A0 + 50
✓	A0
✓	A0 + 55
✓	A0
✓	A0 + 60
✓	A0
✓	A0 + 65
✓	A0
✓	A0 + 70

✓	Bemerkung
✓	A0
✓	A0 + 75
✓	A0
✓	A0 + 80
✓	A0
✓	A0 + 85
✓	A0
✓	A0 + 90
✓	A0
✓	A0 + 95
✓	A0
✓	A0 + 100
✓	A0
✓	A0 + 105
✓	A0
✓	A0 + 110
✓	A0
✓	A0 + 115
✓	A0
✓	A0 + 120
✓	A0
✓	A0 + 125
✓	A0
✓	A0 + 130
✓	A0
✓	A0 + 135
✓	A0
✓	A0 + 140

✓	Bemerkung
✓	A0
✓	A0 + 145
✓	A0
✓	A0 + 150
✓	A0
✓	A0 + 155
✓	A0
✓	A0 + 160
✓	A0
✓	A0 + 165
✓	A0
✓	A0 + 170
✓	A0
✓	A0 + 175
✓	A0
✓	A0 + 180
✓	A0
✓	A0 + 185
✓	A0
✓	A0 + 190
✓	A0
✓	A0 + 195
✓	A0
✓	A0 + 200
✓	A0

(Mittelpunkt
um Breite
clip verschieben)

(Mittelpunkt
um Breite clip
verschieben!)

$l_0 = 199,98cm$

$l_{eff} = 197,8cm - 0,05cm = 197,3cm$

Gewicht: 287,95g

Zustand: gutgerade ohne sichtbare Mängel; beim
Abrollen ganz leicht eins